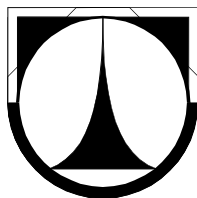


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní



DISERTAČNÍ PRÁCE

2010

Ivana Dosedělová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Doktorský studijní program: TEXTILNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: Textilní technika

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: Katedra konfekční výroby

Školitel: Doc. Ing. Otakar Kunz, CSc.

DISERTAČNÍ PRÁCE

Název: Analýza vlastností spojů technických konfekcí
s ohledem na způsob zatěžování

Title: Analysis of the properties of the seam
of technical readymade products
with respect to the method of straining

Rozsah práce:

Počet stran: 197

Počet obrázků: 78

Počet tabulek: 54

Počet grafů: 13

Počet příloh: 10

Počet zdrojů: 36

Autor: Ivana Dosedělová

V Liberci 5.3.2010

.....
podpis

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně s využitím uvedených přístrojů, postupů a literatury.

V Liberci 5.3.2010

.....
podpis

ANOTACE

Název DP: Analýza vlastností spojů technických konfekcí
s ohledem na způsob zatěžování

Klíčová slova: technická konfekce, šev, namáhání, pevnost, ráz

Práce se zabývá problematikou analýzy teoretických poznatků a stanovením vlastností šitých spojů u výrobků, kde je třeba zohlednit způsob namáhání. Náplň práce je rozdělena do tří hlavních kapitol.

V úvodní kapitole jsou charakterizovány technické konfekce a jejich spoje jako entita, která musí splňovat vysoké nároky na kvalitu.

V další kapitole je provedena základní teoretická analýza mechanicko-fyzikálních vlastností spojů. Je zde definována pevnost a roztažnost spoje jako jeho základní funkční vlastnost. Podrobně je provedena analýza determinačních faktorů, které zásadním způsobem ovlivňují mechanicko-fyzikální vlastnosti spojů při jejich vytváření nebo při užívání výrobků. Jejich znalost bude podkladem pro projektování spojů – správnou volbu parametrů materiálu, šicí nitě a technologie zpracování.

Náplní další kapitoly je stanovení mechanických charakteristik, které popisují vlastnosti spojů a které jsou závislé na jednom z determinačních faktorů – na způsobu zatěžování. Je to především způsob působení síly, směr působící síly a rychlost změny velikosti síly, které je třeba zohlednit při testování spojů. Tato kapitola je členěna na dvě části – jedna se zabývá stanovením mechanických charakteristik při quasistatickém namáhání, druhá stanovením mechanických charakteristik při rázovém namáhání. Každá z těchto částí je pak členěna na oblast teoretického stanovení a oblast experimentální identifikace mechanických charakteristik.

V práci je předložen matematický model pro predikci pevnosti šitého spoje při quasistatickém namáhání jako lineární funkce pevnosti nití v kliče, koeficientu opotřebení niti, počtu vazných bodů na příslušné délce švu a koeficientu švu. Koeficienty švu pro vybrané typy švů jsou experimentálně verifikovány. Charakterizovat odolnost švu vůči namáhání je možno také stanovením modulů plošné napjatosti švu, proto je v práci provedena aplikace algoritmu výpočtu modulů plošné napjatosti na oblasti švů. Dále jsou vymezeny teoretické podklady pro objasňování šíření rázu v nitích a plošných textiliích.

Jednou z podmínek výzkumu vlastností spojů v dynamickém režimu je vyřešení možnosti laboratorního testování dynamických vlastností, tzn. navržení a sestrojení vhodného přístroje, který umožní měření těchto mechanických charakteristik a dále vytvoření metody pro stanovení pevnosti v rázu. Na základě experimentálního měření je provedena analýza součinitele dynamického působení z hlediska vlivu vstupních parametrů technologického vypracování spoje. Dále je provedena experimentální analýza dynamických charakteristik švu (rázové pevnosti jako maximální rázové síly, impulzu síly a deformační práce) a experimentální analýza deformace rázově namáhaného vzorku se švem – je vyhodnocena maximální poměrná deformace a průběh deformace při rázovém působení síly, výsledky jsou konfrontovány s deformací stejně provedených vzorků při quasistatickém namáhání.

ANOTATION

Theme: Analysis of the properties of the seam of technical readymade products with respect to the method of straining

Key words: technical readymade product, seam, stress, strength, impact

This work deals with problems of the analysis of the theoretical knowledge and determination of the properties of sewn seams of the products, where the method of straining is necessary to take into account. The content of the work is divided into three main chapters.

Introductory chapter characterizes technical readymade products and its seams as an entity, which must fulfill high demands on quality.

Basic theoretical analysis of the mechanical-physical properties of the seams is done in the next chapter. Strength and stretchability of the seam is defined here as the basic functional property of the seam. Here is also done the analysis of determination factors, which determine mechanical-physical properties of the seam in the principal way while the seam is made or while the product is used. Knowledge of the determination factors will be the base for projecting of the seams – it means the choice of parameters of the material, choice of the sewn threads and choice of technology of the processing.

The next chapter deals with the determination of the mechanical characteristics, which describe the properties of the seams. The characteristics depend on the one from determination factors – on the method of straining. It is very necessary to take into account the method of acting force, direction of acting force and speed of change of magnitude of the force during the testing of the seams. This chapter is divided into two parts – one deals with determination of mechanical characteristics during quasistatic straining, second deals with determination of the mechanical characteristics at the impact straining. Each of these parts is divided into the area of theoretical determination and the area of experimental identification of the mechanical characteristics.

This work defines mathematical model for prediction of the strength of the sewn seam during quasistatic straining as linear function of strength of threads in a loop, coefficient of abrasion of thread, number of tied points on given length of the seam and coefficient of the seam. Coefficients of the seams for selected types of the seams are experimentally verified. Resistance of the seam against straining can be characterized also by determination of modules of areal state of stress, and it is the reason why the application of algorithm of calculation of modules of areal state of stress in the area of seams is done in this work. Next the theoretical bases are specified to clarify the spread of the impact in the threads and in the areal textiles.

Solving of the possibility of the laboratory testing of dynamical properties is one of the conditions of research, which deals with the properties of the seams in dynamical mode. The apparatus for measuring of these mechanical characteristics was projected and constructed and method for determination of impact strength was defined. Analysis of the impact coefficient, from the view of the initial parameters of technological processing of the seam, is done on the basis of the experimental measuring. Next experimental analysis of dynamical characteristics of the seam (impact strength as the maximal impact force, impulse of the force and deformation work) and experimental analysis of deformation of impact strained sample with the seam is done. Maximal relative deformation and the course of deformation at impact is evaluated. The results are confronted with deformation of the same samples which are strained quasistatically.

ANNOTATION

Titel: Analyse der Eigenschaften der Verbundstellen technischer Konfektionen unter Berücksichtigung der Belastungsweise

Schlüsselwörter: technische Konfektion, Naht, Beanspruchung, Festigkeit, Stoßkraft

Diese Arbeit befasst sich mit der Problematik der Analyse theoretischer Erkenntnisse und der Definition der Eigenschaften genähter Verbundstellen bei Produkten, bei denen die Weise der Beanspruchung zu berücksichtigen ist. Der Inhalt der Arbeit ist in drei Hauptkapitel eingeteilt.

Im Einführungskapitel werden die technischen Konfektionen und ihre Verbundstellen als Einheit, die große Ansprüche an Qualität erfüllen muss, charakterisiert.

Im weiteren Kapitel wird die grundlegende theoretische Analyse der mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Verbundstellen durchgeführt. Hier wird die Festigkeit und die Dehnbarkeit der Verbundstellen als ihre Grundfunktion definiert. Die Analyse der determinierenden Faktoren, die grundsätzlich die mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Verbundstellen bei ihrer Formung oder bei der Anwendung der Produkte beeinflussen, wird detailliert durchgeführt. Ihre Kenntnis wird zur Grundlage für die projektierten Verbundstellen – die richtige Wahl der Materialparameter, des Nähgarns und der Technologie der Ausarbeitung.

Der Inhalt des weiteren Kapitels ist die Definition der mechanischen Charakteristiken, die die Eigenschaften der Verbundstellen beschreiben und die von einem der determinierenden Faktoren abhängig sind – je nach Art der Belastung. Es ist dies vor allem die Art der Kraftwirkung, die Richtung der Kraftwirkung und die Geschwindigkeit der Größenänderung der Kraft, die man beim Testen der Verbundstellen berücksichtigen muss. Dieses Kapitel wurde in zwei Teile geteilt – das eine beschäftigt sich mit der Definition der mechanischen Charakteristik bei quasistatischer Beanspruchung, das andere mit der Definition der mechanischen Charakteristik bei stoßartiger Beanspruchung.

Jeder dieser Teile ist dann in einen Bereich theoretischer Definition und einen Bereich experimentaler Identifikation mechanischer Charakteristik eingeteilt. In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell für die Prädiktion der Festigkeit der genähten Verbundstelle bei quasistatischer Beanspruchung als lineare Funktion der Garnfestigkeit in der Kurbel, des Koeffizienten des Garnverschleißes, der Anzahl der Verbindungspunkte an der entsprechenden Länge der Naht und des Koeffizienten der Naht vorgelegt.

Die Koeffizienten der Naht für ausgesuchte Nahttypen werden experimentell verifiziert. Es ist möglich, die Widerstandsfähigkeit der Naht der Belastung gegenüber auch durch die Definition der Module flächenhafter Straffheit des Saumes zu charakterisieren, deshalb wird in dieser Arbeit die Applikation des Algorithmus der Modulberechnung flächenhafter Straffheit im Bereich der Nähte durchgeführt. Weiter werden theoretische Unterlagen für die Darlegung der Erweiterung der Stoßkraft in den Garnen und flächenhaften Textilien bestimmt.

Eine der Bedingungen der Untersuchung der Eigenschaften von Verbindungsstellen im dynamischen Regime ist die Lösung der Möglichkeit der Laboruntersuchung dynamischer Eigenschaften, d.h. das Vorschlagen und die Konstruktion eines geeigneten Gerätes, das das Messen dieser mechanischen

Charakteristiken ermöglicht und weiter die Formung der Methode für die Definition der Festigkeit in der Stoßkraft.

Auf der Grundlage der experimentellen Messung wird eine Analyse der Faktoren der dynamischen Wirkung aus der Sicht des Einflusses der Eingangsparameter der technologischen Ausarbeitung der Verbindungsstelle durchgeführt. Weiter wird eine experimentelle Analyse dynamischer Charakteristiken der Naht (Festigkeit der Beschaffenheit als maximale Beschaffenheit der Stärke, Kraftimpuls und Deformationsarbeit) und eine experimentelle Analyse der Deformation des charakteristisch beanspruchten Musters mit Naht durchgeführt – es wird die maximale durchschnittliche Deformation und der Verlauf der Deformation bei charakteristischem Wirken der Kraft bewertet. Die Ergebnisse werden mit der Deformation gleich behandelter Muster bei quasistatischer Beanspruchung durchgeführt.

.

OBSAH:

1.	ÚVOD	- 9 -
2.	SPOJE TECHNICKÝCH KONFEKcí.....	- 12 -
2.1	CHARAKTERISTIKA TECHNICKÝCH KONFEKcí	- 12 -
2.1.1	Technické textilie	- 12 -
2.1.2	Konfekcionování technických textilií	- 14 -
2.1.3	Aplikace technických konfekcí	- 15 -
2.1.4	Funkce a požadavky na technickou konfekci	- 16 -
2.1.5	Způsoby namáhání technické konfekce	- 17 -
2.2	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY SPOJŮ.....	- 20 -
2.2.1	Způsoby spojování	- 20 -
2.2.2	Charakteristika šitého spoje	- 20 -
2.2.3	Druhy švů v technické konfekci.....	- 22 -
2.2.4	Druhy stehů v technické konfekci.....	- 23 -
2.2.5	Parametry šitých spojů	- 26 -
3.	TEORETICKÁ ANALÝZA VLASTNOSTÍ ŠITÝCH SPOJŮ..	- 29 -
3.1	MECHANICKO-FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	- 29 -
3.1.1	Příčná pevnost spoje.....	- 31 -
3.1.2	Podélná tažnost spoje	- 32 -
3.2	DETERMINAČNÍ FAKTORY	- 33 -
3.2.1	Použitý materiál.....	- 33 -
3.2.1.1	Vliv použitého materiálu na příčnou pevnost spoje.....	- 33 -
3.2.1.2	Vliv použitého materiálu na podélnou roztažnost spoje.....	- 35 -
3.2.2	Parametry spojování.....	- 36 -
3.2.2.1	Vliv parametrů spojování na příčnou pevnost spoje.....	- 36 -
3.2.2.2	Vliv parametrů spojování na podélnou roztažnost spoje	- 40 -
3.2.3	Způsob namáhání	- 42 -
3.2.3.1	Vliv způsobu namáhání na příčnou pevnost spoje.....	- 42 -
3.2.3.2	Vliv způsobu namáhání na podélnou roztažnost spoje.....	- 44 -
3.2.3.3	Vliv způsobu namáhání na testování vlastností.....	- 44 -
4.	STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SPOJŮ.....	- 45 -
4.1	STANOVENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK PŘI QUASISTATICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ	-
4.1.1	Teoretická pevnost při quasistatickém zatěžování.....	- 45 -
4.1.2	Stanovení modulů rovinné napjatosti v quasistatickém režimu.....	- 48 -
4.1.2.1	Závislosti pro výpočet tenzorů deformace.....	- 50 -

4.1.2.2	Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil	- 53 -
4.1.2.3	Určení tenzoru modulů rovinné napjatosti.....	- 57 -
4.1.3	Experimentální identifikace quasistatických charakteristik.....	- 59 -
4.1.3.1	Metody zjišťování pevnosti a tažnosti	- 59 -
4.1.3.2	Verifikace koeficientu švu	- 62 -
4.1.3.3	Identifikace a konfrontace modulů rovinné napjatosti	- 64 -
4.2	STANOVENÍ PEVNOSTI SPOJE PŘI DYNAMICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ	-
4.2.1	Teoretické vyšetřování rázu	- 72 -
4.2.1.1	Dynamický ráz	- 72 -
4.2.1.2	Teorie rázu	- 74 -
4.2.1.3	Metody vyšetřování rázu	- 75 -
4.2.1.4	Analýza působení rázových sil a šíření napětí v elastickém prostředí	- 78 -
4.2.1.5	Vliv viskoelastivity na šíření napětí.....	- 92 -
4.2.1.6	Vliv anizotropie na šíření napětí.....	- 95 -
4.2.1.7	Analytické vyšetřování rázu textilií.....	- 95 -
4.2.2	Experimentální stanovení dynamických charakteristik	- 100 -
4.2.2.1	Přístroj pro měření rázové pevnosti	- 101 -
4.2.2.2	Návrh metody měření rázové pevnosti	- 108 -
4.2.2.3	Základní dynamické charakteristiky	- 111 -
4.2.3	Experimentální analýza dynamických charakteristik	- 116 -
4.2.3.1	Experimentální stanovení součinitele dynamického působení	- 116 -
4.2.3.2	Experimentální analýza závislosti rázové pevnosti na poloze spoje	- 117 -
4.2.3.3	Experimentální analýza deformace rázově namáhaného vzorku.....	- 121 -
5.	ZÁVĚR.....	- 125 -
6.	SEZNAM LITERATURY	- 128 -
7.	SEZNAM PUBLIKACÍ.....	- 131 -
8.	SEZNAM ZKRATEK.....	- 132 -
9.	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ.....	- 134 -
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 138 -

1. ÚVOD

V posledních letech se silně rozvíjí odvětví výroby technických textilií. Vzniklo v 80. letech 20. stol. a nyní proniká do nových, zcela netradičních oblastí využití. Objevují se nové materiály s novými užitnými vlastnostmi i nové technologie výroby. Na prudký rozvoj výroby technických textilií navazuje nově vzniklé odvětví – výroba technických konfekcí. Ukazuje se, že problematika konfekcionování technických textilií přitahuje pozornost odborníků z oblasti výroby technických konfekcí i konfekční techniky a trend využívání textilií v netradičních oblastech má velkou budoucnost.

Vyrábět technickou konfekci znamená zpracovávat plošné technické textilie do *trojrozměrných výrobků*, které slouží ke speciálním účelům. Tyto výrobky nacházejí uplatnění v celé řadě lidských činností a možnosti využití technických textilií se stále rozšiřují.

Technické konfekce musí odolávat náročným podmínkám aplikace, proto je kladen velký *důraz na kvalitu zpracování*. Při selhání funkčnosti výrobků technických konfekcí může dojít v některých případech i k ohrožení lidského života. Výrobce musí v co největším rozsahu respektovat zvláštnosti používaných materiálů a přitom splňovat požadavky uživatelů.

Neustále rostoucí nároky na kvalitu výrobků pak vytvářejí tlak na zkvalitňování nejen procesu výroby, ale také *zkvalitňování a zpřesňování procesu jejich testování*. To představuje především testování funkčnosti a spolehlivosti. Tyto nároky pomůže splnit využití výkonné měřicí techniky v kombinaci s výpočetní technikou, která zajistí archivaci velkého množství naměřených dat a umožní také rychlou dostupnost a analýzu dat.

K tradičním oblastem výzkumu a vývoje technických textilií přistupují výzkumné aktivity v dalších odvětvích – vytváření trojrozměrných textilních výrobků pomocí spojů. Vědeckovýzkumná a vývojová činnost je prováděna jak v rámci vytváření spojů (zde se soustředí především na řešení problematiky textilní techniky nebo problematiky spojování nekonvenčními způsoby), tak v rámci testování spojů (zakládá se hlavně na testování základních funkčních vlastností). Největší důraz je kladen na kvalitu zpracování a s tím související požadavky na *pevnost spoje jako jeho základní funkční vlastnost*.

Předložená práce analyzuje vlastnosti spojů technických konfekcí v závislosti na způsobu zatěžování. Využívá tři typy výzkumných činností:

- *základní teoretickou analýzu*, která směřuje k vymezení a popsání základních pozorovatelných a popsatelných vlastností spojů, k získání poznatků o jejich nejdůležitějších determinujících faktorech a také souvislostech mezi nimi
- *aplikovaný výzkum*, který uplatňuje poznatky základní analýzy a zaměřuje se na specifický a praktický cíl: stanovení teoretické pevnosti spoje při quasistatickém zatěžování a stanovení modulů rovinné napjatosti jako základních charakteristik textilie a spoje
- *experimentální vývoj*, který využívá znalostí a zkušeností a směřuje k vyřešení možnosti laboratorního testování dynamických vlastností a vytvoření metod pro stanovení pevnosti v rázu

Předmětem práce je analýza mechanických vlastností spojů výrobků technických konfekcí a možností jejich stanovení. Smyslem analýzy je připravit podklady pro projektování šitých spojů technických konfekcí.

V úvodní části práce jsou definovány základní pojmy a charakterizovány technické konfekce a jejich spoje. Velmi stručně je vypracován obecný technologický tok výroby technických konfekcí od vytvoření projektové dokumentace po hotový výrobek, následně jsou uvedeny požadavky na tyto výrobky. V návaznosti na výčet výrobků a možností jejich uplatnění v různých oblastech využití jsou nastíněny důsledky namáhání v závislosti na způsobu namáhání. Spoje používané při výrobě technických konfekcí jsou charakterizovány z hlediska prostorové konfigurace spojovaného materiálu a nitě, jejich parametrů a nejčastějšího uplatnění ve výrobcích. Práce je zaměřena na šité spoje, jako na nejfrekventovanější způsob spojování.

V druhé části práce jsou analyzovány nejdůležitější vlastnosti spojů z pohledu uplatnění technických konfekcí a stanoveny faktory ovlivňující tyto vlastnosti jak při výrobě, tak při užívání hotových výrobků. Determinační faktory jsou sledovány z hlediska příčin a vlivu. Především jsou definovány souvislosti mechanicko-fyzikálních vlastností se strukturou a parametry spoje. Práce se zaměřuje na ty vlastnosti spojů, které jsou závislé na způsobu namáhání – tzn. mechanicko-fyzikální vlastnosti (a to zejména na pevnost jako nejdůležitější funkční vlastnost). Dále se práce zaměřuje na spoje, které jsou matematicky popsitelné (a které jsou také nejčastěji využívány při spojování textilií) – tj. šité spoje.

Třetí část práce se zabývá stanovením základních mechanických charakteristik spojů – a to matematicky pomocí predikční funkce nebo experimentálně pomocí zkušebního přístroje. Práce uvádí možnosti stanovení pevnosti a tažnosti spoje v quasistatickém režimu namáhání a stanovení modulů rovinné napjatosti jako charakteristiky, která vyjadřuje odpor proti takovému namáhání pro konkrétní stav napjatosti. Pro teoretické stanovení skutečné pevnosti šitého spoje byly v práci verifikovány koeficienty švu. Práce také analyzuje možnosti stanovení rázové pevnosti. Součástí výzkumu je návrh konstrukce a sestavení vhodného přístroje, který umožní měření mechanických charakteristik v dynamickém režimu a dále návrh vhodné metody měření základních dynamických charakteristik a vyhodnocování výsledků z těchto měření.

Stanovení mechanických charakteristik podle praktických aplikací technických konfekčních výrobků povede ve svém důsledku ke stanovení optimálních konstrukčních parametrů spoje, ke zkvalitnění procesu projektování spojů a snížení náročnosti procesu testování hotových výrobků.

Práci je nutno považovat za výchozí dílo k řešení dalších problémů, které vznikají v této oblasti využití textilií. V této práci jsou vytýčeny dva hlavní a korespondující cíle:

- prvním cílem je *vytvoření a rozvoj teorie parametricky popsitelných vlastností* textilních spojů, jako výkladu předkládajícího obecné podstatné charakteristiky spojů, včetně analýzy hlavních determinačních faktorů ovlivňujících mechanicko-fyzikální vlastnosti, výkladu definujícího vlastnosti spojů, jejich odlišnosti a zvláštnosti a určujícího vztahy pro jejich výpočet;
- druhým cílem je *vývoj přístroje pro testování rázové pevnosti*, který umožní simulovat rázové namáhání na laboratorním vzorku textilního materiálu – na plošné textilii nebo textilii se spojem a dále vypracování metody pro hodnocení pevnosti v podmínkách dynamického namáhání.

Disertační práce je řešena v oblasti aplikace technických textilií do technických konfekcí. Stěžejní částí výroby technických konfekcí je spojovací proces, avšak problematika spojování technických textilií a výroba technických konfekcí není v literatuře příliš rozšířená. Není publikována *literatura*, která by poskytovala ucelené informace. Dílčí informace poskytují odborné časopisy pro výrobce a zpracovatele technických textilií a výrobce s tímto souvisejících strojů a zařízení jako např. Technische Textilien, Mellinand international (Frankfurt nad Mohanem) nebo IFAI Media Guide (mediální průvodce Mezinárodní asociace textilního průmyslu).

Ani problematika testování technických konfekcí a vlastností spojů těchto výrobků není v literatuře řešena na odpovídající úrovni. Vlastnosti spojů byly analyzovány ve vztahu k výrobkům oděvních konfekcí nikoli však u výrobků technických konfekcí. Práci na dané téma publikoval O. Kunz (viz [14]). Autor zde uvádí základní vlivy na pevnost spoje, dále model výpočtu teoretické příčné pevnosti hřbetových švů. Aby bylo možno vztah použít k predikci pevnosti a projektování švů, je třeba stanovit koeficienty švu. V závěru uvedené práce je také diskutován význam analýzy vlastností spojů pro oděvní konfekce z hlediska směru působících sil.

Při řešení úloh nelineární mechaniky poddajných těles, kterými jsou i textilie, se využívá náhrada reálných těles spojitým prostředím – kontinuem. Podrobně se zabývá teorií mechaniky textilií, jako geometricky a fyzikálně nelineárního, směrově orientovaného útvaru, B. Stríž (viz [15, 16]), jež zde odhaluje teoretické závislosti mezi strukturou a vlastnostmi textilních produktů.

V současné době jsou pro stanovení pevnosti spoje standardně používány normované experimentální metody (viz [17,18]), které jsou realizované jako příčné namáhání v quasistatickém režimu. Pro stanovení rázové pevnosti spoje nejenže není stanovena norma či metoda měření, ale doposud nebyl ani zkonstruován přístroj, který by umožňoval měření rázové pevnosti plošné textilie, natož jejího spoje. Práce se bude snažit zaplnit tuto mezeru ve výzkumu vlastností textilních spojů.

Citovaná literatura se vůbec nezabývá nad rázovým namáháním textilních spojů. Problematikou rázu se sice zabývají některé práce [např. 24, 25], ale tyto práce jsou zaměřeny na analýzu namáhání nití v šicím procesu s výstupy použitelnými pro výrobce šicích nití.

Vzhledem k tomu, že odborná literatura vztahující se k danému tématu není známa, byly prvotním zdrojem informací odborníci z oboru výroby technických konfekcí. Výrobci řeší problematiku zpracování technických textilií a způsoby testování dle možností vlastními silami. K testování pevnosti využívají v případě quasistatického namáhání laboratorní vzorky a dynamometry, v případě rázového namáhání technických konfekcí kontrolují kvalitu zkouškami již hotových výrobků.

Byl také proveden průzkum u výrobců zkušebních zařízení. Žádná z firem nenabízí zařízení, na kterém by bylo možno jakkoli testovat rázovou odolnost plošných textilií. Proto byl k tomuto účelu navržen a zkonstruován prototyp přístroje, který pracuje na principu Charpyho kladiva.

Ve školách je této problematice věnována zatím jen malá pozornost. *

* Střední odborné školy se technickými konfekcemi nezabývají vůbec. Na FT TU v Liberci existují volitelné předměty ve studijních plánech na katedrách KKV a KOD (předmět Výroba technických konfekcí), KNT (předmět Technické textilie). Předměty jsou zařazeny jako výběrové do studijních programů magisterského nebo bakalářského studia. Na těchto katedrách vzniká řada diplomových, bakalářských a speciálních semestrálních prací s problematikou konfekcionování technických textilií [33, 34, 35, 36 aj.].

2. SPOJE TECHNICKÝCH KONFEKcí

Úvodní kapitola je věnována stručné charakteristice výrobků technických konfekcí s ohledem na způsob jejich namáhání, především pak charakteristice jejich spojů.

2.1 CHARAKTERISTIKA TECHNICKÝCH KONFEKcí

Technické konfekce jsou výrobky z textilních materiálů sloužící ke speciálním účelům. Textilní materiály používané k jejich výrobě jsou klasifikovány jako technické textilie. Technické konfekce vznikají dle [1] v procesu konfekcionování (konfekčního zpracování), což znamená hromadnou výrobu pro předem neznámého zákazníka.

Technické konfekce jsou výrobky z technických textilií, vyrobené hromadně pro anonymního uživatele s přesně stanoveným, speciálním účelem použití.

Nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích – využívají se jako ochrana před vnějším prostředím, slouží jako obal či nahrazují předměty z jiných (klasických) materiálů, umožňují manipulaci s předměty apod. Zahrnují i oděvní výrobky, které neodpovídají obvyklému používání, jako jsou například ochranné a pracovní oděvy.

U technických konfekcí jsou prioritní charakteristiky funkčnosti, bezpečnosti a trvanlivosti, příp. fyziologické (na rozdíl od oděvních konfekcí, kde vyžadujeme módnost, estetičnost, snadnost údržby apod.).

2.1.1 Technické textilie

Technické textilie* jsou materiály mající vláknitou strukturu, jsou zkonstruované pro speciální funkční aplikace. Chovají se podle určitých, předem stanovených funkčních vlastností.

Technické textilie jsou inženýrsky konstruované textilie pro přesně vymezené podmínky aplikace [2].

Svým charakterem jsou velmi rozdílné od jemných materiálů (hedvábnické tkaniny na padáky, sítě, síta pro filmový tisk, filtry), přes speciální oděvní či bytové textilie, až po tuhé materiály využívané ve stavebnictví, geodézii apod. Plošná měrná

* Textilie je souhrnný název pro textilní suroviny a z nich vyrobené polotovary a výrobky. Obsahuje-li výrobek mimo textilní suroviny také jiný materiál, lze ho považovat za textilií, pokud vlastnosti textilního povrchu a fyzikálně-technologické vlastnosti textilie jsou podstatné pro použití výrobku a netextilní materiál má jen doplňující funkci.

hmotnost se pohybuje od 50 do 2000 g/m². Navíc textilie nemusí být vždy ve výrobku přímo viditelné, ale mohou být jeho integrální součástí (např. textilie v kompozitních materiálech, izolační materiály staveb, zpevnění pneumatik, vnitřní složky neprůstřelných vest, součásti filtračních zařízení, náhrada tkání či orgánů).

Správným výběrem vláken, přízí a výrobní technologie mohou být přesně navrženy pro speciální funkční použití. Užité vlastnosti a použitelnost výrazně ovlivňují také finální úpravy textilií (hydrofobní, fungicidní, nehořlavé, apod.).

Vlákna používaná pro technické textilie

- přírodní vlákna
 - rostlinného původu: len, konopí, juta, bavlna
 - živočišného původu: vlna
- chemická vlákna
 - z přírodních polymerů: viskóza
 - ze syntetických polymerů: polypropylen, polyester, polyamid, polyuretan
 - hutnická: kovová, skleněná
- speciální vlákna (high-tech vlákna)
 - vysoce výkonná vlákna (vysoce pevná vlákna, vlákna s vysokým modulem, tepelně odolná vlákna)
 - vysoce funkční vlákna (vlákna se zlepšenými tepelnými vlastnostmi, vlákna se zlepšeným komfortem, vlákna chránící proti UV záření, vlákna odolná vůči mikroorganismům, napodobení přírodního hedvábí, mikrovlákná, vlákna se speciálními barevnými efekty, voňavá vlákna)
 - vlákna pro speciální aplikace (vlákna pro medicínu, vlákna pro čisté provozy, vlákenné absorbenty)
 - speciální polymery (biopolymery, vlákna z plísní)
 - vlákna pro kompozita (whiskery, keramická vlákna)

[4]

Struktura technických textilií

Struktura textilií udává její vnitřní uspořádání. Závisí na konstrukci textilie (vazba, složení), určuje vzhled povrchu textilie, ovlivňuje mechanicko-fyzikální vlastnosti textilie (pevnost, tažnost, pružnost, splývavost), propustnost, tepelně-izolační vlastnosti.

Odlišujeme technické textilie:

- lineární (mají jeden rozměr dominantní)
 - lana, provazy, šňůry
 - pásy
 - nitě
- plošné (mají dva rozměry dominantní)
 - tkaniny (biaxiální)
 - pleteniny (osnovní)
 - netkané textilie (plstěné, vpichované, proplétané, všívané, pojené)
 - multiaxiální textilie
 - speciální vazby (perlinkové)
 - sítě (vázané, pletené)
 - distanční textilie (sandwich)

- trojrozměrné
 - tkané (hadice)
 - pletené (ujímané)
 - netkané (plstěné)
 - provazované
 - šité
 - lepené

2.1.2 Konfekcionování technických textilií

Konfekcionováním se rozumí hromadná výroba konečných výrobků rozličných tvarů a velikostí.

Při výrobě technických konfekcí jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu a technologii zpracování. Výrobky musí splňovat náročné požadavky při užití, musí být nejen funkční, ale i bezpečné a trvanlivé, neboť při používání by mohly být i ohroženy lidské životy. Navíc technologie konfekcionování musí zajistit takové zpracování technických textilií, aby nebyly znehodnoceny jejich speciální vlastnosti.

Konfekcionování technických textilií musí být dáno odborným technologickým postupem, který zajišťuje požadavky aplikace technických konfekcí (tzn., že musí respektovat podmínky, pro které jsou technické konfekce určeny a současně také zpracovatelské vlastnosti technických textilií, aby svými operacemi tyto textilie nezneškodnocovalo).

Konfekční zpracování probíhá ve dvou fázích

- vytvoření projektové dokumentace
- technologické zpracování

Projektová dokumentace je souhrn podkladů pro výrobu. Obsahuje návrh výrobku, určuje výběr materiálů, konstrukční řešení, stříhovou a technologickou dokumentaci. Technologická dokumentace zahrnuje mimo jiné pracovní postupy operací, které musí být přesným návodem k provedení dané operace. Jejich součástí je exaktní stanovení způsobu spojování a parametrů spoje, které musí odpovídat požadavkům na použití technických konfekcí.

Při vlastním *technologickém zpracování* probíhají procesy oddělovací, spojovací a dokončovací. Hlavním úkolem oddělovacího procesu je přesně oddělit díly a součásti výrobku, na kvalitu spoje nemá vliv. Spojovací proces zajišťuje spojení dílů a součástí do jednoho celku – finálního výrobku. Nejvíce ovlivňuje kvalitu, resp. trvanlivost výrobku, v závislosti na provedení spojů.

Při vytváření spojů rozlišujeme konvenční spojování (šití) a nekonvenční spojování (lepení, nýtování, svařování). Je volen takový způsob, aby vyhovoval druhu materiálu a funkčnosti výrobku a také způsobu namáhání spoje.

Šití je nejčastějším způsobem spojování, uplatňuje se u všech druhů technických konfekcí. Spojovacím materiálem je nit, její výběr musí odpovídat složení materiálu a účelu využití výrobku. Kvalitu spoje určuje korespondence textilie – nit – jehla. Jehly používané při šití speciálních materiálů mají přizpůsobené hroty, aby nepoškozovaly

textilie. Také šicí stroje, uzpůsobeny pro speciální výrobu, musí být přesně seřízeny. Základním spojovacím prvkem je steh. Na jeho volbě (druhu), správném vytvoření a přesně stanovené délce závisí kvalita spoje. Kvalita dále závisí na druhu švu – při výrobě technických konfekcí se nejčastěji uplatňují přeplátované švy, neboť jsou pevnější, trvanlivější a méně propustné. Šitý spoj představuje vytvoření otvoru do textilie, proto je nutné u některých výrobků zajistit nepropustnost tím, že se přelepí proužkem jiného materiálu.

Nekonvenční způsoby spojování se využívají na speciální aplikace, buď jako samostatný spoj nebo spoj zesilující či zpevňující. Lepením se vytváří spojení pomocí spojovacího materiálu (adheziva) a to působením tlaku a event. tepla po určitou dobu. Využívá se k přelepování švů a vyztužování. Při nýťování vznikne pomocí nýtu tzv. bodové spojení. Uplatňuje se při zpevňování a zajišťování spojů vzniklých jinými způsoby. Svařování nevyžaduje spojovací materiál, ale musí být použity textilie s minimálně 60% podílem termoplastických vláken. Využíváno je svařování vysokofrekvenční (vyžaduje nejen materiály termoplastické, ale také polární) a ultrazvukové. Mimo tyto metody existují ještě vývojové metody spojování a pojení (tepelné, mikrovlnné, vyjiskřovací, plazmové, elektronové, radiační a laserové), jež se prozatím v praxi nevyužívají.

2.1.3 Aplikace technických konfekcí

Šíře aplikací technických textilií je rozsáhlá. Oblasti využití znázorňuje logo výstavy TECHTEXTIL (obrázek 2.1). V daných oblastech jsou využívány jak technické textilie, tak i technické konfekce.



Obrázek 2.1: Logo výstavy *TECHTEXTIL*

Druhové produkty technických konfekcí podle oblastí využívání

- ochranné oděvy a obuv (pracovní oděvy, ochranné oděvy pro extrémní podmínky – proti chladu, teplu, ohni, vodě, chemikáliím, elektrickému proudu, požezání, palným zbraním, radiaci, kontaminaci, hmyzu, bakteriím,...)
- technické konfekce pro zdravotnictví a hygienu (pláště, pokrývky, roušky, pleny, nosítka, ortézy, bandáže, náhrady cév,...)
- technické konfekce pro stavebnictví a lehké stavby (haly, stany, přístřešky, atypické zastřešení, markýzy, deštníky, slunečníky, protipovodňová hrazení,...)
- technické konfekce pro automobilový průmysl (airbagy, autoplachty, bezpečnostní pásy, autosedačky, vnitřní výbava aut, střechy kabrioletů,...)

- technické konfekce pro zemědělství (fóliovníky, ochranné plachty, kořenové obaly, závěsy, nádrže,...)
- technické konfekce pro geoinženýrství (svislé drény, rohože, izolace, lože pro různé skládky, nepropustné záchytné vany...)
- technické konfekce pro přepravu a obaly (pytle, vaky, žoky, kontejnery, kufry, batohy, tašky, pouzdra, peněženky, obaly na knihy, dětské kočárky,...)
- technické konfekce pro nábytkářský průmysl (potahy, koberce,...)
- technické konfekce pro průmyslové aplikace (hadice, filtry, náhrada kovových materiálů,...)
- technické konfekce pro sport a volný čas (spací pytle, zahradní lehátka, nafukovací lehátka, plachty pro lodě, plavidla, čluny, rogalá, padáky, balony, trampolíny, bóje, větrné rukávy,...)

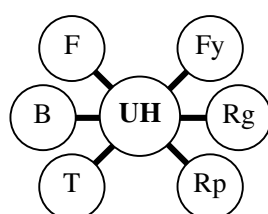
2.1.4 Funkce a požadavky na technickou konfekci

Nároky na výrobky z technických textilií vyplývají především z jejich účelu využití. Očekává se od nich, že budou plnit svou funkci při současném zajištění maximální bezpečnosti a dlouhodobé trvanlivosti.

Nejčastější funkce technických konfekcí

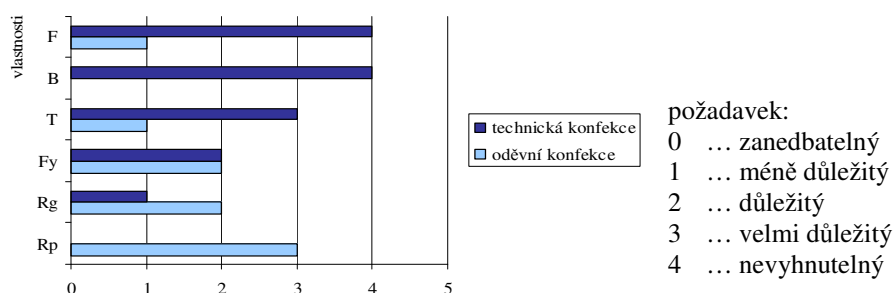
- ochrana
- zábrana
- obal
- náhrada
- umožňují manipulaci s předměty

Požadavky na vlastnosti určují užitnou hodnotu výrobku. Zatímco u oděvní konfekce jsou nejdůležitější vlastnosti reprezentativní, fyziologické a regenerační, u technických konfekcí jsou nejvyšší nároky kladeny na **funkčnost, bezpečnost a trvanlivost**.



UH ... užitná hodnota výrobku
 F ... funkčnost
 B ... bezpečnost
 T ... trvanlivost
 Fy ... fyziologické vlastnosti
 Rg ... regenerační vlastnosti
 Rp ... reprezentativní vlastnosti

Obrázek 2.2: Schematické znázornění užité hodnoty výrobku



Graf 2.1: Skladba požadavků na vlastnosti konfekcí

2.1.5 Způsoby namáhání technické konfekce

Způsob namáhání technické konfekce je ovlivňován především typem výrobku a účelem použití. Při užívání výrobků z technických textilií dochází k namáhání nejen textilie, ale také jejich spojů.

Namáhání znamená působení určitých vlivů (mechanických, tepelných, UV záření, bakterií,...), jejichž důsledkem je fyzikální změna.

Mechanické namáhání znamená působení sil na materiál, jejichž důsledkem je vznik napětí a deformace. Tyto změny jsou závislé na působící síle – její velikosti, směru, době trvání působení, rychlosti změny velikosti síly.

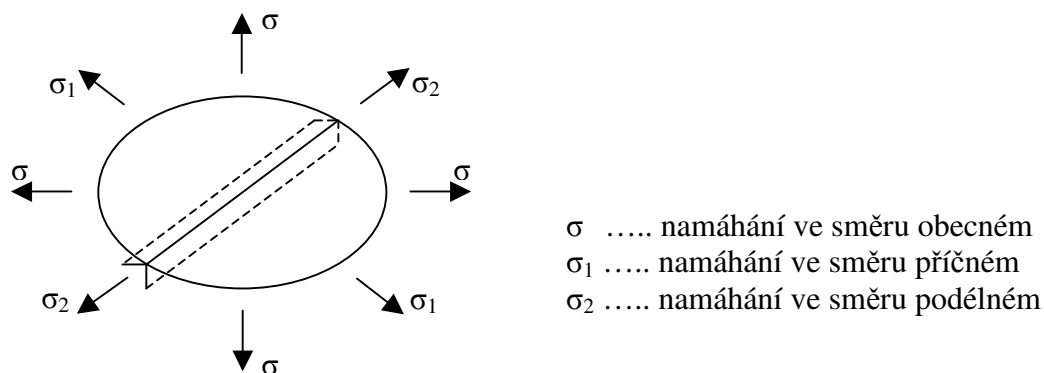
Velikost působící síly je dána konkrétní aplikací. Obecně lze říci, že výrobky technické konfekce jsou namáhány silami několikanásobně většími (10^4 N) než výrobky oděvní konfekce (10^2 N).

V závislosti na směru působící síly je možno mechanické namáhání definovat jako namáhání na tah, tlak, ohyb, případně krut. Tato jednotlivá namáhání obvykle nepůsobí samostatně, ale v různých kombinacích. Výrobek je pak vystaven složenému namáhání. Příklady výrobků namáhaných v závislosti na směru působících sil uvádí tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Příklady výrobků namáhaných v závislosti na směru působících sil

namáhání	technická konfekce
tahem	bezpečnostní pásy, padáky, lehátka, ...
tlakem	podlážky stanů, spací pytle, autopotahy, ...
ohybem	tašky, stany, deštníky, pouzdra, ...
působení síly v jednom směru	bezpečnostní pásy, řemeny,...
působení sil ve více směrech	airbagy, padáky, hadice,...

U konfekčních výrobků je významné především **namáhání tahové**. Díky anizotropii textilií, zvláště pak textilií se švem, můžeme pro tahové namáhání rozlišit dle směru působících sil namáhání v příčném, podélném či obecném směru vůči směru švu (obr. 2.3).



Obrázek 2.3: Schematické znázornění namáhání švu

[5]

Pro stanovení pevnosti švu je určující namáhání působící ve směru příčném. **Příčné namáhání švu** je realizováno jako síla působící kolmo ke švu.

V závislosti na době trvání působení a na rychlosti změny velikosti síly lze odlišit mechanické namáhání:

- **quasistatické** – je způsobené spojitou silou (zatížení se postupně zvětšuje)
- **rázové** – je způsobené dynamickým úderem (síla působí rychle a po krátký čas)

Tabulka 2.2: Příklady výrobků namáhaných v závislosti na rychlosti změny působících sil

namáhání	technická konfekce
quasistaticky	pracovní oděvy, spací pytle, batohy, nosítka, autosedačky, slunečníky, zahradní lehátka, filtry, bandáže, ...
rázově	airbagy, bezpečnostní pásy, padáky, trampolíny, protipovodňová hrazení, větrné rukávy, lodní pachtý, ...

Důsledky mechanického namáhání

Namáhání vyvolané působením vnějších sil se projevuje v celém výrobku. Síly mohou působit různými směry a budou vyvolávat různé napětí v různých částech výrobku. Nejkritičtější místa jsou spoje – tj. místa, kde došlo k přerušení materiálu a jeho následnému spojení se stejným či jiným materiálem, případně s více materiály a to v obecném případě různou technologií. Základním důsledkem tohoto působení je deformace nebo destrukce materiálu.

Deformace – přetvoření, změna tvaru tělesa vyvolaná působením vnějších sil – při tahovém namáhání textilie prodloužení ve směru působící síly a zúžení v kolmém směru. Deformaci lze vyjádřit v absolutních jednotkách jako *absolutní prodloužení* Δl [mm], pro potřeby srovnávání deformací různých vzorků je nutno ji přepočítat na relativní jednotky a stanovit *relativní (poměrné) prodloužení* ε [%].

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

kde: l ... konečná délka vzorku po natažení [mm]
 l_0 ... počáteční (upínací) délka vzorku [mm]

Relativní prodloužení při přetrhu nazýváme *tažnost* [%] - je definována jako poměr maximálního prodloužení zkušební vzorku při přetrhu k jeho výchozí délce (*roztážnost* [%] je poměrné protažení vzorku tažnou silou, která ještě nestačí k přetrhu).

Deformaci popisujeme jako *vratnou (elastickou)* a *nevratnou (plastickou)*. Elastické deformace lze očekávat pouze při působení velmi malých sil, kde je průběh závislosti $F = f(\Delta l)$ lineární. Pak definujeme *pružnost (elasticitu)* jako schopnost látek vrátit se do původního stavu po tom, co síla přestane působit. U kovových materiálů je lineární závislost popisována Hookeovým zákonem a vyjádřena Youngovým modulem

pružnosti, pro textilie lze vyjádřit pouze počáteční tangentový modul. Při tahovém namáhání textilie dochází k deformacím *viskoelastickým* a závislost síly na prodloužení graficky znázorňují tahové diagramy.

Při tahovém namáhání textilie se švem navíc dochází k deformacím definovaným jako ***posuv nití ve švu*** (obr. 2.4). Pevnost v posuvu nití je definována jako síla potřebná k překonání tření mezi vzájemně provázanými nitěmi.



Obrázek 2.4: *Posuv nití ve švu*

Destrukce znamená zničení, rozklad, zkázu, úplné a nevratné poškození materiálu nebo švu. Dojde-li k destrukci je výrobek znehodnocen.

K nevratnému porušení švu může dojít:

- *destrukcí šicích nití* – pevnost švu pak limituje pevnost nitě (tato pevnost se navíc snižuje opotřebením v šicím procesu, které je ve značné míře závislé na druhu použité šicí nitě, na její pevnosti v kličce, druhu a charakteru stehu a švu – při vlastním šití je způsobené odíráním nitě o vodiče, stehotvorná ústrojí a šitý materiál). Dojde-li k destrukci švu přetržením šicí nitě je někdy výrobek opravitelný.
- *destrukcí šitého materiálu* – dochází zejména k poškození tkaniny v těsné blízkosti švu. Příčinou může být poškození materiálu při procesu šití nebo příliš nízká pevnost materiálu. Destrukci šitého materiálu je výrobek zcela znehodnocen.

2.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY SPOJŮ

Kapitola specifikuje základní atributy spojů, které jsou podstatné pro další výklad a vymezení jejich vlastností. Definuje základní pojmy, uvádí princip tvorby stehu a podmínky pro kvalitu spoje, předkládá druhy švů a stehů, jejich strukturu a parametry.

2.2.1 Způsoby spojování

Chceme-li vyrábět z plošných textilií prostorově tvarované výrobky, musíme jednotlivé díly nebo pásy technických textilií určitým způsobem spojovat. Výběr vhodného způsobu spojování závisí na druhu textilie, na jejím složení, struktuře, povrchové úpravě, druhu povrstvovací hmoty, na účelu a způsobu využití výrobku a též na umístění spoje ve výrobku. Spoje jsou vytvářeny nejen mezi plošnými textiliemi, ale i při upevňování doplňků, jako jsou šňůry, poutka, kroužky, háčky, přezky, zipy, velcropásky apod.

Spojování lze rozdělit podle způsobu provedení na konvenční a nekonvenční. *Konvenční spojování* je šití, jeho charakteristickým znakem je rozebíratelnost. Mezi používaná *nekonvenční spojování* patří lepení, nýtování, svařování a dále některé vývojové metody. Tyto spoje jsou nerozebíratelné. Práce se dále zabývá spoji *šitými*, neboť jsou při konfekcionování nejfrekventovanější.

2.2.2 Charakteristika šitého spoje

Spojování šitím znamená prostorové uspořádávání dvou a více textilií a vytváření řádků stehů v místě styku těchto textilií opakovaným provazováním nitě v dané konfiguraci textilií. Místo spojení je označováno jako *šev*. Elementární část švu je *steh*. Základní prvek stehu je *klička*. Místo provázání základních prvků je *vazný bod*.



a) jednoduchý uzavřený
vazný bod

b) jednoduchý otevřený
vazný bod

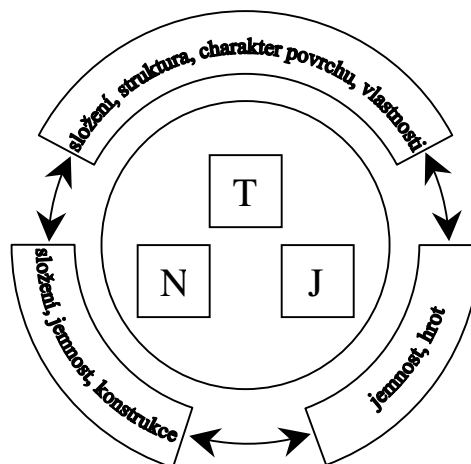
c) složený
vazný bod

Obrázek 2.5: Grafické znázornění vazného bodu

[6]

Šití je proces formování a vzájemného provazování základních prvků stehu ve vazných bodech (obr. 2.5). Při konfekcionování technických textilií se uplatňuje výhradně strojové šití, jehož podstata spočívá v propíchnutí šitého materiálu jehlou, zavedení jehelní nitě na výpichovou stranu šitého materiálu a vytvoření kličky z jehelní nitě tak, že oba konce nitě jsou na vpichové straně. Dále je nutné zajištění kličky jehelní nitě kličkou téže nebo jiné nitě, které může být provedeno různými způsoby (kap. 2.2.4).

Šitím lze spojovat všechny druhy textilií. K vytváření šitého spoje je třeba spojovací materiál – nit. Tvorbu stehu a kvalitu spoje ovlivňují vzájemné vztahy mezi textilií (T), nití (N) a jehlou (J) (obr. 2.6).



Obrázek 2.6: Schematické znázornění vztahů D-N-J

Použitá textilie je prvotní a určující. Volba nití a jehly musí vycházet ze spojovaného materiálu.

Volba niti musí vycházet nejen ze spojovaného materiálu, ale i požadavků na spoj. Vlastnosti nití musí odpovídat struktuře a vlastnostem materiálu. Sleduje se především materiálové složení, pružnost a pevnost a podle toho se volí optimální nit a v návaznosti také druh stehu.

Na výběr nitě navazuje výběr vhodné jehly, která musí odpovídat nejen šitému materiálu, aby nedošlo k jeho poškození, ale též jemnosti šicího materiálu. Podle nitě volíme jemnost jehly, která poskytuje niti ochranu před opotřebením v dlouhé drážce. Podle charakteru textilie pak volíme vhodný hrot jehly. Sleduje se hustota, vazba a povrchová úprava materiálu (na běžné materiály se používá kulatý hrot – odsouvá nitě textilie, aniž by je nabodával, na husté tkaniny je nutný ostrý hrot, na jemné tkaniny mírně zakulacený, na pleteniny zakulacený hrot – při průchodu vazbou nevtahuje příze, na plasty a povrstvené materiály se používá řezný hrot). Šicí jehly mohou průpichem mechanicky poškodit povrch materiálu, pokud tloušťka jehly neodpovídá materiálu nebo má jehla nevhodný nebo poškozený hrot. Dále může u syntetických materiálů nastat tepelné porušení povrchu a to tehdy, je-li teplota jehly vlivem tření vyšší než je teplota tavení příslušných vláken.

- Úroveň textilie-nit určuje především, jak bude spoj pevný. Částečně ovlivní roztažnost spoje v návaznosti na použitý druh stehu.
- Úroveň nit-jehla ovlivňuje opotřebení niti a tudíž její pevnost. Jehla poskytuje ochranu niti v dlouhé drážce.
- Úroveň jehla-textilie ovlivňuje pevnost spoje, respektive možnost poškození textilie hrotem jehly.

Šité spoje jsou definovány druhem švu, druhem stehu a parametry šitých spojů.

2.2.3 Druhy švů v technické konfekci

Švem rozumíme místo spojení dvou nebo více (stejných nebo různých) vrstev materiálů (a to různou technologií, v tomto případě šitím). Druh švu je dán způsobem vzájemného uspořádání šitého materiálu. Rozdělení druhů švů do osmi tříd udává ISO norma 4916 (mezinárodní norma, která třídí, označuje, popisuje a ilustruje varianty švů).

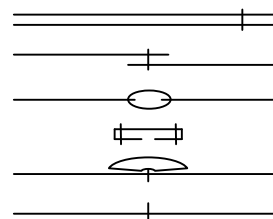
Třídy švů

- třída 1 – hřbetové švy (26 variant)
- třída 2 – přeplátované švy (46 variant)
- třída 3 – lemovací švy (32 variant)
- třída 4 – dotykové švy (14 variant)
- třída 5 – ozdobné šití (44 variant)
- třída 6 – začistišťovací šití (8 variant)
- třída 7 – začistišťovací švy (82 variant)
- třída 8 – obrubovací švy (32 variant)

[7]

Z hlediska namáhání lze spoje rozdělit do skupin:

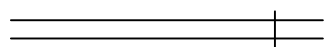
- hřbetové – jedno nebo více řádkové
- přeplátované
- dotykové
- šití z pásků
- našívání netextilních prvků
- ozdobné šití



Švy nejčastěji využívané při výrobě technické konfekce

Šev 1.01.01

- jednoduchý hřbetový šev (obr. 2.7)
- nejjednodušší způsob spojení
- využívá se u spojů s nižšími nároky na pevnost a tam, kde je třeba spoj po ušití rozložit



a)



b)

Obrázek 2.7: Struktura švu 1.01.01: a) prostorová konfigurace při šití
b) prostorová konfigurace po rozložení (ve výrobku)

Šev 2.04.04

- zakládáný přeplátovaný šev (obr. 2.8)
- hotovený v jedné operaci na dvoujehlovém šicím stroji se zakladačem
- velice pevný šev, využívá se u spojů namáhaných na tah



Obrázek 2.8: Struktura švu 2.04.04

2.2.4 Druhy stehů v technické konfekci

Steh je rovinný nebo prostorový útvar vytvořený nití v šitém materiálu. Druh je dán způsobem vzájemného provázání základních elementů ve vazných bodech. Rozdělení druhů stehů do šesti tříd udává ISO norma 4915 (mezinárodní norma, která třídí, označuje, popisuje a ilustruje varianty stehů).

Třídy stehů

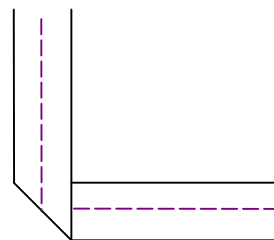
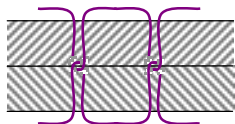
- třída 100 – jednonitné řetízkové (8 variant)
- třída 200 – ruční stehy (20 variant)
- třída 300 – dvou a vícenitné vázané stehy (51 variant)
- třída 400 – dvou a vícenitné řetízkové stehy (17 variant)
- třída 500 – obnitkovací stehy (22 variant)
- třída 600 – krycí stehy (9 variant)

[8]

Stehy nejčastěji využívané při výrobě technické konfekce

Steh 301

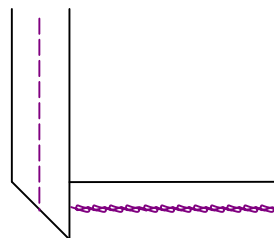
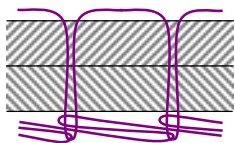
- základní dvounitný vázaný steh (obr. 2.9)
- nejběžnější a současně nejvyužívanější druh stehu, pevný, málo roztažný
- využívá se u málo roztažných materiálů k sešívání vrstev nebo našívání prvků, případně prošívání (zpevňování)



Obrázek 2.9: Základní struktura stehu 301 a stopa nití ze strany vpichové a výpichové

Steh 401

- dvounitný řetízkový steh (obr. 2.10)
- velmi často využívaný steh, pevný a roztažný
- využití nachází nejen u pletenin a elastických materiálů, ale s výhodou se využívá u švů vedených v kosém směru tkaniny a švů vysoce namáhaných na tah
- není vhodný u švů namáhaných na oděr



Obrázek 2.10: Základní struktura stehu 401 a stopa nití ze strany vpichové a výpichové

Modifikace základní struktury stehů

Strukturu stehu, tj. uspořádání základních elementů stehu – tzv. vazných bodů, určují způsoby vzájemného provázování fragmentů jedné nebo více nití.

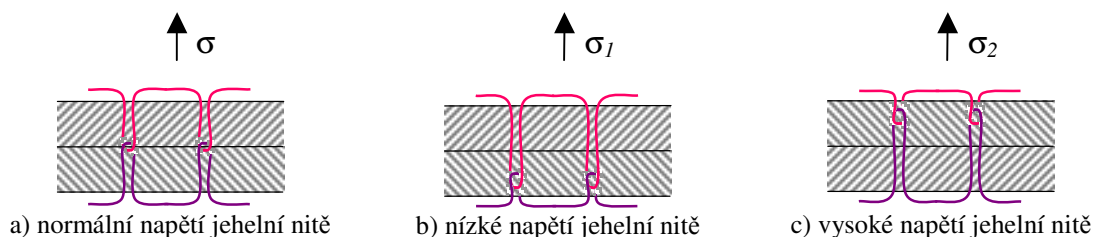
Modifikace struktury jsou určeny charakteristickým položením kliček ve stehu nebo změnami provázání vazných bodů. Jsou dány různými podmínkami při tvorbě stehu. Důsledkem je odlišný vzhled a především vlastnosti stehu.

a) Modifikace struktury dvounitných vázaných stehů

U dvounitných vázaných stehů jsou modifikace struktury stehu výsledkem změn napětí jehelní niti nebo změn při spolupráci stehotvorných mechanismů.

Modifikace struktury stehu 301 určené změnami napětí jehelní niti (obr. 2.11):

- steh s normálním napětím
- steh s nízkým napětím jehelní niti
- steh s vysokým napětím jehelní niti



Obrázek 2.11: Struktura stehu dvounitného vázaného v závislosti na napětí niti

$$\sigma_1 < \sigma < \sigma_2$$

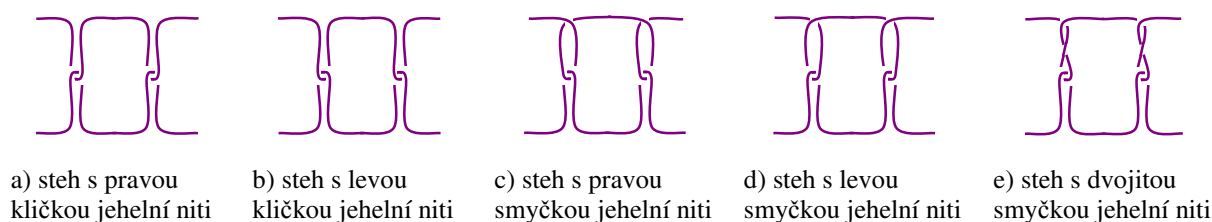
Základní kličku charakterizuje minimální spotřeba horní a spodní nitě. Vytvořený steh má kličky spodní a horní nitě provázány uprostřed spojovaných textilií (obr. 2.11a). V takovém případě dochází k rovnoměrnému namáhání horní a spodní nitě.

V odůvodněných případech (např. za účelem zvýšení roztažnosti švu, případně při stehování) je sníženo napětí horní nitě, čímž dojde k přemístění vazných bodů a zvýšení zásoby horní nitě ve stehu (obr. 2.11b). Je-li současně použita vhodná (pružnější) spodní nit, zvýší se roztažnost švu.

Vysoké napětí horní nitě není z hlediska tvorby a využití stehu účelné, neboť při šití dochází k zvýšené spotřebě spodní niti (s omezenou zásobou) a především při užití dochází k zvýšenému tahovému namáhání jehelní niti až s důsledkem její destrukce.

Modifikace struktury stehu 301 určené podmínkami spolupráce stehotvorných mechanismů (obr. 2.12):

- steh s pravou kličkou jehelní niti
- steh s levou kličkou jehelní niti
- steh s pravou smyčkou jehelní niti
- steh s levou smyčkou jehelní niti
- steh s dvojitou smyčkou jehelní niti



Obrázek 2.12: Struktura stehu dvounitného vázaného v závislosti na spolupráci stehotvorných orgánů

Vznik daných modifikací závisí dle [9] na následujících faktorech:

- směr posuvu textilie (např. při uzašití)
- poloha osy chapače a postavení hrotu chapače vzhledem k hrotu jehly
- smysl otáčení chapače (vzhledem k odtahu textilie)
- poloha spodní niti vzhledem k jehle
- zněna směru jehelní niti (při šití klikatého stehu)

Steh s pravou kličkou jehelní niti vzniká při dopředném šití a při použití horizontálního chapače se smyslem otáčení proti odtahu textilie. U stejného typu chapače při zpětném chodu stroje vniká steh s pravou smyčkou jehelní niti. Při dopředném šití a při použití horizontálního chapače se smyslem otáčení ve směru odtahu textilie vzniká steh s levou smyčkou jehelní niti, u stejného typu chapače při zpětném chodu stroje vniká steh s levou kličkou jehelní niti. U horizontálních chapačů s osou ve směru odtahu textilie může vzniknout steh s dvojitou smyčkou v závislosti na poloze spodní niti vzhledem k jehle (je-li zleva, vzniká dvojitá smyčka).

Vznik smyčky při tvorbě stehu je nežádoucí. Provázání kličkou je volnější a nit není tolik namáhána na oděr. Provázání smyčkou způsobuje větší namáhání nitě s následkem zvýšené přetrhivosti při šití a častější destrukce při užití.

b) Modifikace struktury dvounitných řetízkových stehů

U dvounitných řetízkových stehů závisí modifikace dle [6] na směru vcházení kličkaře do jehelní kličky (zleva nebo zprava) a také na napětí jehelní niti.

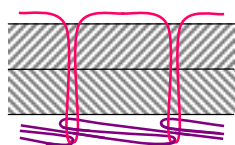
Modifikace struktury stehu 401 v závislosti na směru vcházení kličkaře:

- steh s překladem levým
- steh s překladem pravým

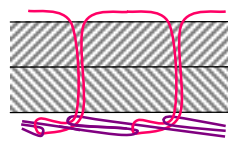
Změna směru vcházení kličkaře do jehelní kličky je příčinou vzniku dvou struktur, přičemž vždy vzniká smyčka (důsledek principu tvorby řetízkového stehu).

Modifikace struktury stehu 401 v závislosti na napětí jehelní niti (obr. 2.13):

- steh s normálním napětím jehelní niti
- steh s nedostatečným napětím jehelní niti (u dvounitných řetízkových stehů mohou nastat různé varianty vzhledu)



a) normální napětí



b) nedostatečné napětí jehelní niti

Obrázek 2.13: Struktura stehu dvounitného řetízkového v závislosti na napětí niti

Základní strukturu charakterizuje dvojité provázaný řetízek na spodní straně textilie ze spodní nitě, horní nit je na spodní straně málo viditelná. V odůvodněných případech (např. za účelem kontroly chybějících stehů) je sníženo napětí horní nitě, čímž dojde k přemístění vazných bodů a zvýšení viditelnosti horní nitě na spodní straně textilie a tím zvýšení viditelnosti provázání (obr. 2.13b). Nadměrné snížení napětí horní nitě vede ke snížení spotřeby spodní nitě a tím ke snížení elastických vlastností stehu.

2.2.5 Parametry šitých spojů

Parametry šitých spojů jsou veličiny charakterizující danou konfiguraci. Ovlivňují vlastnosti spojů. Jsou dány parametry stehů a parametry švů.

- a) **Parametry stehů** charakterizují danou prostorovou konfiguraci nití v šitém materiálu a závisí na způsobu tvorby stehu:

▪ **délka stehu l [mm]**

- je definována jako vzdálenost dvou po sobě následujících vpichů jehly měřená ve směru délky šití (obr. 2.14)
- může mít stálou hodnotu nebo programově předurčenou změnu v technologickém cyklu



Obrázek 2.14: Schematické znázornění délky stehu

▪ **hustota stehu h [s/cm]**

- je definována jako počet stehů na stanovenou měrnou jednotku (nejčastěji na 1 cm délky šití)

$$h = \frac{10}{l} \quad (2.3)$$

- doporučená hustota u konfekčních výrobků pro namáhané švy je 5 s/cm, pro montážní švy 4 s/cm, pro pomocné švy a prošívání 3 s/cm, začištění okrajů záložek a švů obnitkováním 3-4 s/cm

▪ **šířka stehu (rozpích jehly, rozpětí jehel) r [mm]**

- je definována jako vzdálenost mezi dvěma vpichy jehly měřená ve směru kolmém ke směru šití (obr. 2.15)



Obrázek 2.15: Schematické znázornění šířky stehu

▪ **spotřeba nitě na steh d [mm]**

- je dána druhem stehu, délkou stehu l , šířkou stehu r a tloušťkou spojovaných vrstev t
- další faktory ovlivňující spotřebu nitě na steh: přítlak patky (ovlivňuje správný posuv), napětí nitě (závisí na druhu materiálu a druhu nitě), druh nitě (silnější a tužší nitě neleží ve stehu rovně, ale obloukovitě a zvýší spotřebu nitě na steh)
- v závislosti na druhu stehu je odlišná spotřeba jehelní nitě d_{jn} a spodní nitě d_{sn}
- lze určit výpočtem nebo experimentálně (vypáráním nití ze stehového řádku o stanoveném počtu stehů). Výpočtem se spotřeba nitě na steh určí sumací spotřeby nitě na jednotlivé úseky stehu U . Tyto úseky jsou přibližně rovné části stehu od jednoho ohybu nitě k dalšímu. Považujeme je za přímky, ale ve skutečnosti se díky tuhosti nitě a deformaci materiálu jedná o zakřivené čáry. Jev je možno zohlednit konstantou K . Obecný výpočetní model pro různé druhy stehu má tvar:

$$d = \sum_{i=1}^4 n_i U_i \quad (2.4)$$

kde: n_i je počet stejných úseků stehu vedených podélně ($i=1$), kolmo ($i=2$), pod úhlem ($i=3$) ke směru šití nebo kolmo ($i=4$) k rovině šití, určuje se ze schematického znázornění stehu

U_1 je délka části nitě mezi dvěma vpichy umístěné na povrchu materiálu rovnoběžně se směrem šití, odpovídá délce stehu l

U_2 je délka části nitě mezi dvěma vpichy umístěné na povrchu materiálu kolmo ke směru šití, odpovídá šířce stehu r

U_3 je délka části nitě mezi dvěma vpichy umístěné na povrchu materiálu pod úhlem ke směru šití, odpovídá přeponě pravoúhlého trojúhelníku s odvěsnami l (délka stehu) a r (šířka stehu)

U_4 je délka části nitě umístěné uvnitř materiálu kolmo k rovině šití, odpovídá tloušťce materiálu t

Výpočetní model pro spotřebu nitě na steh dostává tvar:

$$d = (n_1 l + n_2 r + n_3 \sqrt{l^2 + r^2} + n_4 t) K \quad (2.5)$$

kde: n počet stejných úseků stehu

l ... délka stehu [mm]

r ... šířka stehu [mm]

t ... tloušťka materiálu [mm]

K ... konstanta (0,9-1,1)

- **poloha vazného bodu**
 - je dána umístěním místa překřížení nití
 - u dvounitných vázaných stehů je žádoucí, aby byly vazné body uprostřed spojovaných vrstev (viz obr. 2.11a), neboť pak jsou obě nitě stejně namáhány. Potřebujeme-li zvýšit roztažnost spoje se stehem 301, je možné přemístit vazné body na spodní stranu textilie (viz obr. 2.11b) a použít spodní nit s větší roztažností.
 - u řetízkových stehů jsou vazné body umístěny na povrchu spojovaných vrstev, což je dáno způsobem tvorby těchto stehů
- b) **Parametry švů** charakterizují danou prostorovou konfiguraci textilie a závisí na druhu švu:
 - **šířka švové záložky s [mm]**
 - je definována jako vzdálenost od prvního řádku stehů po okraj textilie (obr. 2.16)



Obrázek 2.16: Šířka švové záložky a) hřbetový šev; b) přeplátovaný šev

- velikost je volena podle materiálu, druhu švu, druhu výrobku, umístění švu na výrobku
- **vzdálenost stehových řádků r [mm]**
 - u dvoujehlových šicích strojů je totožná s rozpětím jehel
 - vzdálenost je nutné volit s ohledem na odolnost materiálu proti poškození.
- **počet stehových řádků p**
 - odpovídá počtu spodních nití
 - švy mohou být tvořeny několika řadami stehů v závislosti na použitém stehu a druhu švu
- **spotřeba nitě na šev D_s [mm]**
 - je dána spotřebou nití d na steh vynásobená počtem stehů ve švu (respektive vynásobená délkou švu L_s a hustotou stehu h) a počtem stehových řádků p

$$D_s = 0,1L_s h p (d_{jn} + d_{sn}) \quad (2.6)$$

3. TEORETICKÁ ANALÝZA VLASTNOSTÍ ŠITÝCH SPOJŮ

Analyzovat vlastnosti šitých spojů je důležité z hlediska potřeby projektování spojů. Požadavky na vlastnosti spojů jsou různé a jsou odvozeny od druhu výrobku a účelu použití. Konfekční výrobky (a to především technického charakteru) musí často odolávat náročným podmínkám aplikace. Kvalita výrobku je závislá nejen na kvalitě použitých materiálů, ale také na kvalitě spoje. Spoj nesmí být nejslabším článkem u výrobků, kde může dojít k ohrožení bezpečnosti nebo zdraví člověka.

Teoretická analýza si klade za cíl *specifikovat základní poznatky a definovat zaklaní projevy šitých spojů*, tedy jejich vlastnosti. Teorie rozpracovává obecná pravidla pro charakterizování vlastností dle identifikačních parametrů a ovlivňujících faktorů.

Základním objektem zkoumání - entitou je spoj na textilií. V místě spoje je narušena struktura materiálu a dle způsobu spojování je dodán spojovací prvek. Některé vlastnosti textilie se přenášejí do spoje bez podstatných změn, některé mohou vykazovat v důsledku kombinace různých vlivů významné změny.

Spoje jsou charakterizovány celým *souborem vlastností*. Tyto vlastnosti reprezentují chování spojeného materiálu v různých podmínkách působení prostředí.

Vlastnosti spoje lze rozdělit na:

- **funkční** – mechanicko-fyzikální, tepelně izolační, nepropustnost, ...
- **estetické** – tuhost, splývavost, hladkost, ...

Pro technické konfekce jsou důležité zejména vlastnosti funkční, které vyjadřují odolnost vůči působení vnějšího prostředí.

Práce se dále zabývá těmi vlastnostmi, které jsou závislé na způsobu namáhání – tedy *mechanicko-fyzikálními vlastnostmi*. Aby šev plnil svou funkci, musí mít především určitou **pevnost a tažnost**, která odpovídá danému materiálu. Vhodnou volbou parametrů spojování je možné ovlivnit funkčnost, bezpečnost a trvanlivost výrobku.

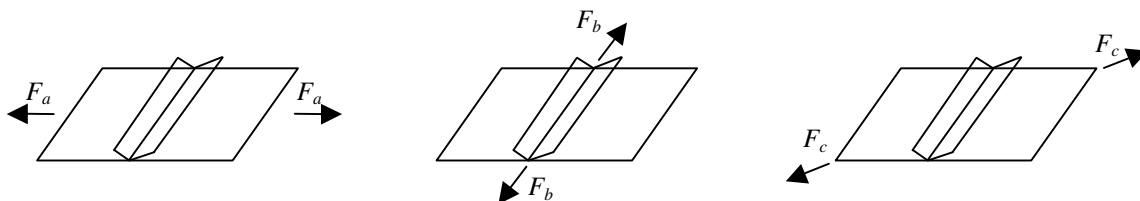
3.1 MECHANICKO-FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Pro textilní materiály a potažmo jejich spoje lze definovat následující mechanicko-fyzikální vlastnosti (přičemž teoretická analýza se bude zabývat pevností a roztažností, jež jsou důležité z hlediska funkčnosti):

- **pevnost**
 - charakterizuje schopnost materiálu (textilie, spoje) odolávat účinkům vnějších sil bez porušení
 - vyjadřuje sílu, kterou je třeba překročit, aby došlo k destrukci materiálu (textilie, spoje), udává se v N
- **roztážnost**
 - charakterizuje schopnost materiálu (textilie, spoje) odolávat účinkům vnějších sil bez porušení
 - vyjadřuje geometrickou změnu materiálu (textilie, spoje) zapříčiněnou vnějším silovým působením, udává se v % z původní délky
 - maximální roztážnost materiálu (textilie, spoje) při poruše (nevratná změna) vyjadřuje **tažnost**

- pružnost (elasticita)
 - vyjadřuje schopnost materiálu vrátit se do svého původního tvaru po odstranění působících vnějších sil, udává se v % z původní délky
 - u textilií (spojů) je pozorovatelná jen v oblasti velmi malých deformací
- tvárnost
 - vyjadřuje schopnost materiálu trvale si uchovat bez porušení kontinuity deformaci vyvolanou účinkem vnějších sil
 - pro textilie (spoje) vyjadřuje jejich schopnost udržet tvar, který jim byl dán působením tepla, vlhka a tlaku
- viskoelasticita
 - charakterizuje vlastnost materiálů, které jsou viskózní a elastické současně, materiálů, u kterých deformace vyvolaná působící silou závisí nejen na její velikosti, ale také na čase
 - vyjadřuje časovou závislost změn deformace v poměru k napětí

Mechanicko-fyzikální vlastnosti textilního materiálu a také spoje závisí na směru namáhání (obr. 3.1). Je to dáno nejen anizotropií textilních materiálů, ale i spoje samotné vykazují anizotropní vlastnosti (bylo by tomu tak i v případě izotropních materiálů).



Obrázek 3.1: Grafické vyjádření tahového namáhání

Působíme-li na spoj silou ve směru kolmém ke směru šití, pak síla potřebná k destrukci spoje vyjadřuje příčnou pevnost spoje. Působíme-li na spoj silou ve směru šití, pak síla potřebná k destrukci spoje vyjadřuje podélnou pevnost spoje. Pevnost v obecném směru je dána poměrem pevností v základních směrech v závislosti na deformačních vlastnostech textilie.

Při namáhání textilií s nízkou roztažností bude platit, že pevnost spoje v podélném směru je téměř rovna pevnosti textilie. Z toho důvodu má větší význam zkoumat pevnost v příčném směru, kterou daleko více ovlivňují parametry spoje.

Naopak pro textilie s vysokou roztažností je důležitější zkoumat namáhání v podélném směru, neboť při působení síly na spoj dochází k výrazné deformaci ve směru působící síly. V příčném směru dochází především k deformaci materiálu a spoj není významně deformován. Naopak v podélném směru dochází přímo k deformaci spoje. Odolnost spoje pak vyjadřuje lépe jiná vlastnost – tzv. podélná tažnost.

3.1.1 Příčná pevnost spoje

Příčná pevnost charakterizuje odolnost spoje proti vnějšímu namáhání, které působí kolmo na směr spojení. Je nejdůležitější vlastností spojů u méně roztažných textilních materiálů.

Příčná pevnost švu vyjadřuje sílu působící kolmo ke švu, kterou je třeba překročit, aby došlo k porušení švu nevratnou změnou – to znamená přetržení nitě, přetržení nití spojovaného materiálu, případně posunutí nití ve švu.

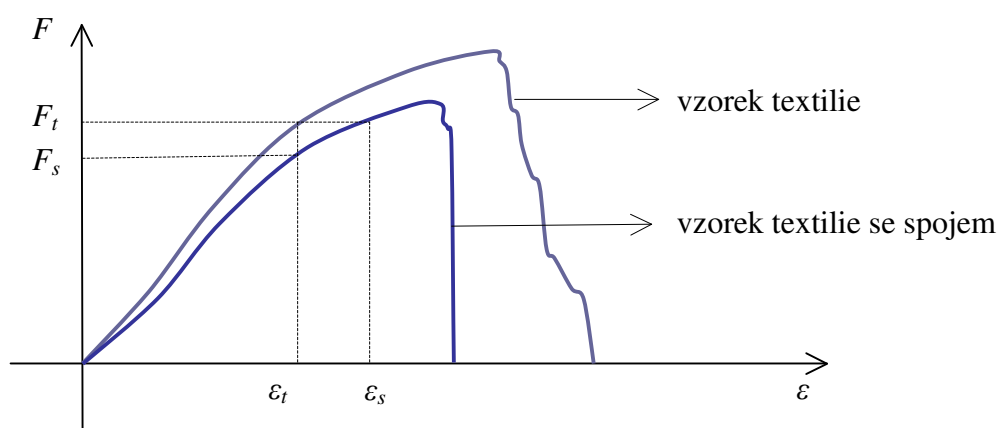
Pro běžné oděvy je účelné, aby příčná pevnost švu byla menší než pevnost textilie, aby v případě destrukce švu došlo k přetrhu nitě, ale pro technické konfekce, kde na pevnosti závisí lidské životy (airbagy, aviatcké prostředky, vázací prostředky,...) je nutné, aby příčná pevnost švu (F_s) byla větší nebo rovna pevnosti textilie (F_t).

$$F_s \leq 0,8 F_t \dots \text{pro běžné oděvy}$$

$$F_s \geq F_t \dots \text{pro technické konfekce}$$

Tahová křivka sešité textilie (obr. 3.2) často vykazuje nižší strmost než tahová křivka nesešitého vzorku. Při dané síle F_t je prodloužení vzorku sešité textilie ε_s větší než nesešité textilie ε_t . Neboli pro dané prodloužení ε_t je třeba menší síly F_s pro vzorek se švem než pro vzorek nesešité textilie F_t .

Pro tahovou křivku sešité textilie je charakteristickým rysem náhlý pokles působící síly při dosažení meze pevnosti švu – vyjadřuje, že při destrukci švu dochází k poškození nití a destrukci vazných bodů spoje v celé šíři vzorku. U vzorku nesešité textilie dochází k postupné destrukci vazných bodů textilie.



Obrázek 3.2: Tahové křivky příčného namáhání (vzorový příklad)

3.1.2 Podélná tažnost spoje

Podélná roztažnost charakterizuje odolnost spoje proti vnějšímu namáhání, které působí ve směru spojení. Je nejdůležitější charakteristikou spojů zhotovených na vysokoroztažných textiliích.

Podélná roztažnost švu vyjadřuje podélnou deformaci při namáhání spoje ve směru šití. Maximální roztažnost spoje při poruše (nejčastěji při přetrhu nitě) vyjadřuje **podélná tažnost švu** ε_{sp} .

Při podélné deformaci vzniká napětí, které se přenáší z části na textilií a z části na šicí nit. Poměr sil závisí na deformačních vlastnostech textilie, na konfiguraci a parametrech švu a na podmínkách tvorby a parametrech stehu.

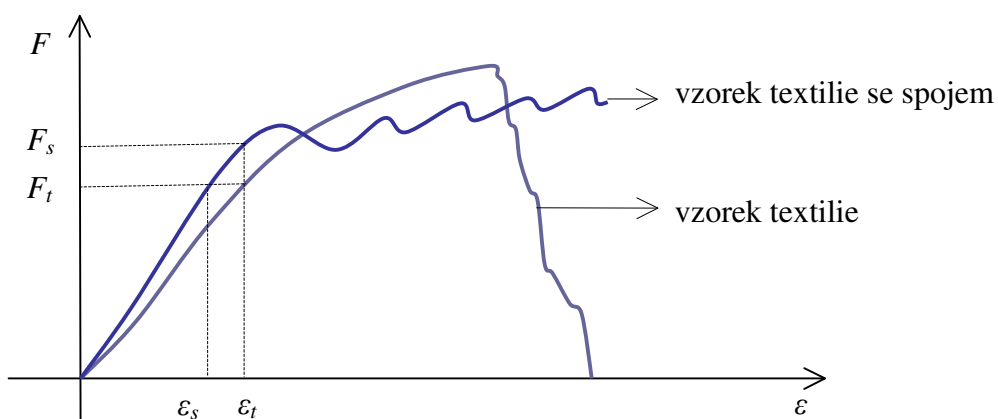
Tahová křivka sešité textilie (obr. 3.3) vykazuje při podélném namáhání opačnou relaci polohy vůči nesešité textilii než při příčném namáhání. Při dané síle F_t je prodloužení vzorku sešité textilie ε_s menší než nesešité textilie ε_t . Neboli pro dané prodloužení ε_t je třeba větší síly F_s pro vzorek se švem než pro vzorek nesešité textilie F_t , což je způsobeno zpevněním textilie švem.

Pro tahovou křivku sešité textilie jsou charakteristickým rysem dílčí poklesy působící síly po dosažení meze pevnosti – vyjadřují, že při destrukci švu dochází k poškození nití a destrukci vazných bodů švu postupně.

Pevnost spoje v tomto případě namáhání není nejdůležitější vlastností. Hlavní důležitost připisujeme hodnotě ε_s – resp. hodnotě rozdílu

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_t - \varepsilon_s$$

která při dané síle F_t definuje rozdíl deformace mezi sešitým a nesešitým vzorkem.



Obrázek 3.3: Tahové křivky podélného namáhání (vzorový příklad)

3.2 DETERMINAČNÍ FAKTORY

Faktory, jež zásadním způsobem ovlivňují mechanicko-fyzikální vlastnosti lze rozdělit do tří skupin:

- použitý materiál
- parametry spojování
- způsob namáhání

Použitý materiál a parametry spojování jsou faktory, které ovlivní mechanicko-fyzikální vlastnosti spojů při jejich vytváření. Způsob namáhání ovlivňuje vlastnosti spoje při užívání výrobků.

3.2.1 Použitý materiál

Použitý materiál ovlivňuje mechanické vlastnosti spojů v závislosti na jeho charakteristikách a to nejen pevnostních. Použití spojovaného materiálu je více méně dané, ovlivnit lze výběr vhodného spojovacího materiálu, techniky a technologie a tyto prvky sladit.

3.2.1.1 Vliv použitého materiálu na příčnou pevnost spoje

Na pevnost má vliv jak materiál spojovaný, tak spojovací, podíl závisí na parametrech spojování (druh a šířka švu, druh a hustota stehu).

Spojovaný materiál

Pevnost švu závisí nejen na samotné pevnosti šitého materiálu, ale i na jeho odolnosti proti opotřebení, respektive sklonu k poškození, které může nastat při technologickém zpracování nebo při používání či údržbě výrobku.

Při používání se projeví vlastnosti materiálu dané jeho složením a strukturou (určující je vazba, tloušťka, hustota, plošná hmotnost, povrchová úprava).

Při zpracování je důležitá odolnost textilie proti poškození způsobenému průpichem jehly. Tento faktor lze ovlivnit výběrem vhodného hrotu jehly.

Tuhost materiálu (daná vazbou a dostavou) ovlivňuje velikost tření nitě o materiál při tvorbě stehu a tím ovlivňuje namáhání nitě na oděr a snížení její pevnosti (viz koeficient pevnosti nitě po šití uvedený dále).

Tloušťka materiálu ovlivňuje počet opakovaných průchodů nitě skrz textilií a tím ztrátu pevnosti nitě. Čím vyšší je tloušťka spojovaných vrstev, tím vyšší je spotřeba nitě na steh, tím se snižuje počet průchodů nitě materiálem a též opotřebení nitě.

Spojovací prvek

Nejvýznamnější vliv na pevnost šitého spoje má pevnost samotných šicích nití. Pevnost nití závisí na pevnosti, počtu a délce vláken, na konstrukci nitě (jemnost a počet jednoduchých nití, směr a počet zákrutů) a povrchové úpravě. U stehů tvořených různou kvalitou nití je rozhodující pevnost nejslabší nití.

Pevnost šitého spoje závisí na pevnosti niti v kličce, jako nejpravděpodobnějšího způsobu namáhání nití ve švu (obr. 3.4).



Obrázek 3.4: Schematické znázornění namáhání nitě v kličce

Pevnost nitě v kličce (F_{nk}) je nižší než dvojnásobek pevnosti nitě v tahu (F_n), dle [10] závisí na koeficientu pevnosti nitě v kličce (φ).

$$F_{nk} < 2 \cdot F_n \quad (3.1)$$

$$F_{nk} = 2 \cdot F_n \cdot \varphi \quad (3.2)$$

kde: F_{nk} pevnost nitě v kličce [N]
 F_n pevnost nitě v tahu [N]
 φ koeficient pevnosti nitě v kličce

$$\varphi = \frac{F_{nkp}}{100} \quad (3.3)$$

kde: F_{nkp} poměrná pevnost nitě v kličce (v % z výchozí pevnosti)

Koeficient pevnosti nitě v kličce nabývá dle [10] různých hodnot pro různé materiály, např.:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{PES}} &= 0,7 \\ \varphi_{\text{kevlar}} &= 0,45 \end{aligned}$$

Pevnost švu závisí také na odolnosti šicího materiálu proti opotřebení při tvorbě stehu nebo při používání výrobku.

Při používání dochází k oděru šicích nití uložených na povrchu textilie a v důsledku toho snížení pevnosti šicích nití a potažmo samotného šitého spoje. Kritickými místy jsou vazné body (viz vliv druhu stehu v kap 3.2.2.1).

Při tvorbě stehu dochází k namáhání nití mechanicky (na oděr, ohyb a tah), termicky a rázově.

Při šití je nejvýznamnější namáhání nitě na oděr, ke kterému dochází při jejím průchodu textilií, třením nitě o nit při utahování stehu, třením o povrchy součástí stroje, jimiž nit prochází (vodiče, regulátor napětí, jehla). Kvalita povrchu stehotvorných orgánů ovlivňuje velikost tření o tyto součásti. Velikost tření o materiál se zvýší, je-li průměr šicí nitě větší než průměr dlouhé drážky jehly. Opotřebení ovlivňuje vazba, dostava, povrchová úprava a tloušťka textilie.

Zahřívání strojní šicí jehly způsobuje u syntetických nití usazování částí vláken v jehelním oušku, dochází k jeho zanášení a následně k zvýšenému odírání nitě.

K největšímu namáhání dochází při průchodu ouškem jehly. Nit zde vykonává vratný pohyb, při tvorbě jednoho stehu projde ouškem dvakrát – při vytváření kličky a při utahování stehu. Nit projde ouškem jehly několikrát, než je zašita do spoje.

Počet průchodů nitě ouškem jehly (p) je dáno vztahem:

$$p = 2 \frac{l_k}{l_{ns}} \quad (3.4)$$

kde: l_k délka kličky pro protažení zásoby spodní nitě [mm]
 l_{ns} délka nitě ve stehu [mm]

Celková ztráta pevnosti nitě po zašití do spoje (Z_C):

$$Z_C = \frac{F_n^o - F_n}{F_n^o} 100 [\%] \quad (3.5)$$

kde: F_n^o pevnost nitě původní [N]

F_n ... pevnost nitě konečná (po opotřebení) [N]

Ztráta pevnosti nitě na jeden vazný bod (Z):

$$Z = 2 \frac{Z_C}{p} \quad (3.6)$$

$$Z = \frac{(F_n^o - F_n) l_{ns}}{F_n^o \cdot l_k} 100$$

Pevnost nití po šití vyjádřená v procentech původní pevnosti:

$$F_{nš} = 100 - Z_C [\%] \quad (3.7)$$

Koeficient pevnosti nitě po šití:

$$\psi = \frac{F_{nš}}{100} \quad (3.8)$$

Firma Gütermann uvádí v [11] doporučené hodnoty pro pevnost polyesterových nití po šití (viz tab. 3.1).

Tabulka 3.1: Doporučené hodnoty pro pevnost polyesterových nití po šití

steh	nit	$Z_C [\%]$	$F_{nš} [\%]$	ψ
dvounitný vázaný	jehelní	20	80	0,8
	spodní	0-4	96-100	0,96-1,0
dvounitný řetízkový	jehelní	5	95	0,95
	spodní	0-2	98-100	0,98-1,0

3.2.1.2 Vliv použitého materiálu na podélnou roztažnost spoje

Podélná roztažnost spoje závisí na vlastnostech šitého materiálu (roztážnosti, tloušťce a stlačitelnosti) a vlastnostech šicí nitě.

Roztažnost šitého materiálu

Roztažnost spoje je shora ohraničená tažností šitého materiálu. Tažnost textilie je ovlivněna vlastnostmi použitých vláken, vlastnostmi přízí, konstrukcí, strukturou a konečnou úpravou textilie. Tažnost textilie závisí na směru působící síly vůči struktuře textilie – jedná se o anizotropní materiál.

Tloušťka a stlačitelnost

Textilie je útvar deformovatelný i v příčném směru. S rostoucí tloušťkou a stlačitelností roztažnost úměrně roste.

Vlastnosti nitě

Nitě používané na roztažné spoje musí mít odpovídající tažnost a pružnost, která však umožní vznik kličky horní nitě při tvorbě stehu. Požadavek splňují syntetické šicí nitě, které jsou tažné a pevné více než nitě z přírodních vláken. Jádrové šicí nitě sdružují přednosti polyesterového hedvábí a bavlny popř. polyesterové stříže. Vlivem polyesterového jádra mají při malém průřezu velmi dobrou pevnost a výhodnou tažnost a bavlňený či polyesterový plášť působí jako tepelný štít.

3.2.2 Parametry spojování

Parametry spojování mají nejvýznamnější vliv na výsledné vlastnosti spojů. Znalost jejich působení a vzájemného ovlivňování umožní efektivní projektování spojů s nejlepšími (příp. optimálními) vlastnostmi.

3.2.2.1 Vliv parametrů spojování na příčnou pevnost spoje

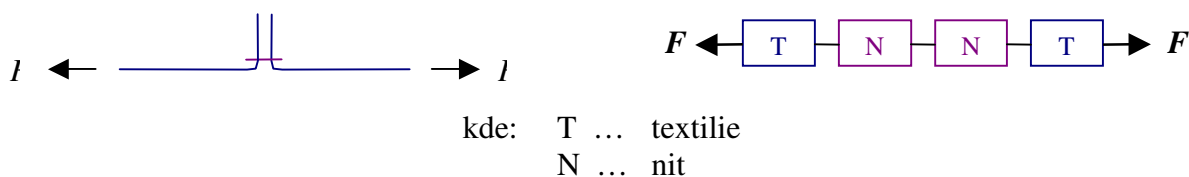
Pevnost ovlivňuje zvolený druh švu, druh stehu, parametry spoje – šířka švu, hustota stehu a také směr šití.

Druh švu

Druh švu určuje počet a prostorové uspořádání spojovaných vrstev materiálu a počet nosných stehových řádků.

Prostorová konfigurace šitého materiálu ovlivňuje tření mezi materiálem a nití a mezi vrstvami materiálu navzájem, což ovlivňuje pevnost. Obecně bude platit: čím větší budou třecí síly, tím větší může být na spoj působící akční síla a tím bude vyšší pevnost.

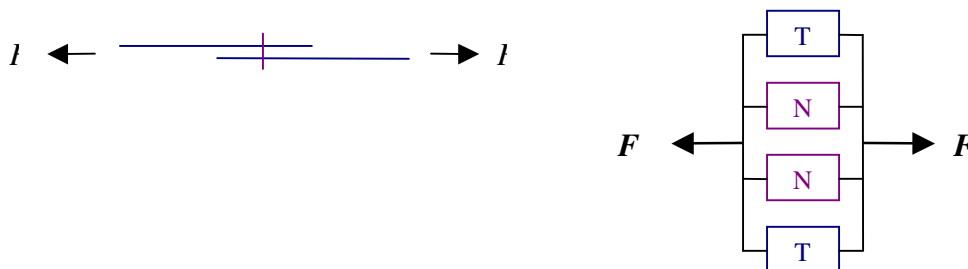
U hřbetových švů působí namáhání přímo na spojovací materiál – na nit. Na vrstvy spojovaného materiálu nepůsobí přítláčná normálová síla a nevzniká tudíž ani tečná reakce. Prvky textilie-nit jsou řazeny sériově (obr. 3.5). Pevnost je závislá pouze na pevnosti niti v kličce a počtu vazných bodů.



Obrázek 3.5: Schematické znázornění namáhání hřbetových švů

U přeplátovaných švů se síla přenáší i na spojovaný materiál. Pevnost závisí na

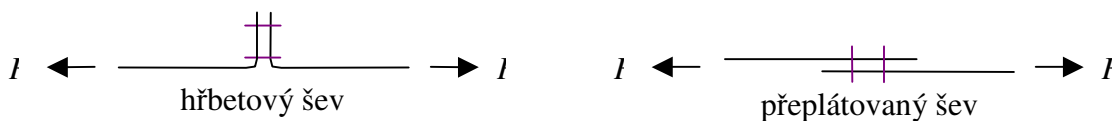
míře sevření vrstev a součiniteli tření mezi vrstvami materiálu. Prvky textilie-nit jsou řazeny paralelně (obr. 3.6).



Obrázek 3.6: Schematické znázornění namáhání přeplátovaných švů

Počet nosných stehových řádků udává počet vazných bodů, což opět ovlivňuje pevnost. U víceřádkových švů dochází k znásobení vazných bodů a ke zvýšení pevnosti. Obecně platí: čím vyšší bude počet vazných bodů, tím vyšší bude pevnost. Je však třeba vzít v úvahu i možné poškození materiálu při šití (viz. kap. 3.2.1.1 a vliv hustoty stehů – uvedeno dále).

Teoreticky by měl být dvouřádkový šev dvakrát pevnější než jednořádkový. Ve skutečnosti tomu tak není, protože při tahovém namáhání švu se síla nevětví do obou řádků rovnoměrně. Příklad rozdílu větvení síly do dvou stehových řádků u různých druhů švu znázorňuje obr. 3.7.



Obrázek 3.7: Rozdíl větvení síly do stehových řádků u dvouřádkových švů

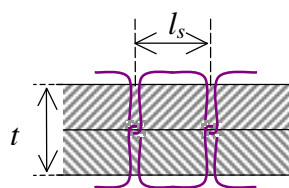
Při sešívání víceřádkového švu je třeba dbát na to, aby byl vytvořen tak, aby se zatížení rozložilo na celou soustavu vazných bodů. Pokud tomu tak není, výhoda víceřádkového švu není využita, při zatížení se šev postupně narušuje a jeho pevnost je stejná jako u švu jednořádkového.

Druh stehu

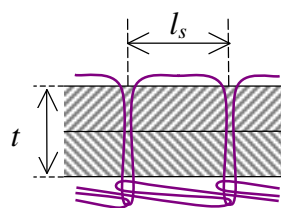
Na druhu stehu závisí počet a umístění vazných bodů spoje.

Počet vazných bodů ovlivňuje pevnost přímo (čím vyšší počet vazných bodů, tím vyšší pevnost). Opět je třeba vzít v úvahu i možné poškození materiálu při šití.

Na umístění vazných bodů závisí intenzita opotřebení nitě při praktickém používání neboť nitě jsou vystaveny vnějšímu tření. Situace je příznivější pro steh 301, který má vazné body umístěny uvnitř vrstev materiálu, vůči stehu 401, který má vazné body umístěny na povrchu materiálu a proto je oděr šicí nitě větší (obr. 3.8).



steh 301



steh 401

Obrázek 3.8: Umístění vazných bodů u stehů 301 a 401

Na druhu stehu, respektive způsobu tvorby stehu, závisí počet opakovaných průchodů nitě materiálem a na tom závisí opotřebení nitě, vzniklé při jeho tvorbě. Při tvorbě stehů dvounitných vázaných je počet průchodů mnohem vyšší než u stehů řetízkových (při tvorbě stehu 301 prochází jehelní nit až 50x materiálem, než je zašita do materiálu, při tvorbě stehu 401 pouze 2-8x), je daleko více namáhána a dochází k většímu opotřebení nitě při šití.

Pro důkaz vyjdeme ze vztahu 3.4 - platí:

$$p_{301} = 2 \frac{l_{k301}}{l_{ns301}} \quad (3.9)$$

$$p_{401} = 2 \frac{l_{k401}}{l_{ns401}} \quad (3.10)$$

kde: p_{301} ... počet průchodů nitě ouškem jehly u stehu 301
 p_{401} ... počet průchodů nitě ouškem jehly u stehu 401
 l_{k301} ... délka kličky horní nitě pro protažení zásoby spodní nitě [mm]
 l_{k401} ... délka kličky horní nitě pro protažení kličky spodní nitě [mm]
 l_{ns301} ... délka horní nitě ve stehu 301 [mm]
 l_{ns401} ... délka horní nitě ve stehu 401 [mm]

Dále platí (viz obr.3.8):

$$l_{ns301} = l_s + t \quad (3.11)$$

$$l_{ns401} = l_s + 2t \quad (3.12)$$

kde: l_s ... délka stehu [mm]
 t ... tloušťka sešíváných vrstev [mm]

I při stejné délce obou stehů l_s bude platit:

$$l_{ns301} < l_{ns401} \quad (3.13)$$

$$l_{k301} > l_{k401} \quad (3.14)$$

a pro počet průchodů bude platit:

$$p_{301} > p_{401} \quad (3.15)$$

Proto také je pevnost švu se stehem 301 nižší než se stehem 401, ale po delší době praktického užívání výrobku jsou vazné body stehu 401 vystaveny většímu oděru, a tím poklesu pevnosti, než je tomu u stehu 301.

Hustota stehů

Parametr určuje počet stehů na jednotku délky, je závislý na délce stehu

$$h = \frac{10}{l_s} \quad (2.3)$$

kde: h hustota stehu [s/cm]
 l_s délka stehu [mm]

Hustota ovlivňuje pevnost přímo:

- počtem vazných bodů (s rostoucí hustotou se zvyšuje počet vazných bodů a roste pevnost)

$$h = 10 \frac{n-1}{b} \quad (3.16)$$

kde: n počet vazných bodů
 b šířka vzorku [mm]

Hustota ovlivňuje pevnost nepřímo:

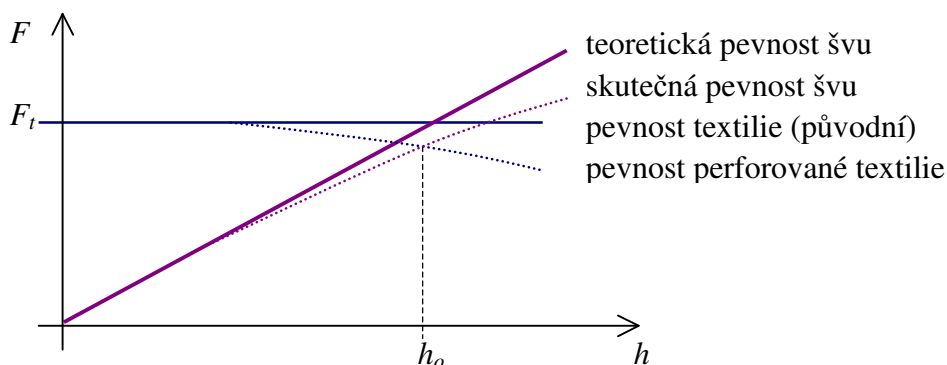
- ovlivňuje intenzitu opotřebení nitě (s rostoucí hustotou roste počet opakovaných průchodů nitě materiálem a klesá její pevnost)

$$p \approx 2 \frac{l_k}{l_s} = 2 \cdot 10^{-1} l_k \cdot h \quad (3.17)$$

kde: p počet průchodů nitě materiálem
(vztah 3.17 platí přibližně, předpokládáme-li, že tloušťky materiálu jsou malé vzhledem k délce stehu)

- ovlivňuje intenzitu opotřebení materiálu (s rostoucí hustotou se zvyšuje počet průpichů a nebezpečí porušení šité textilie a poklesu její pevnosti)

Závislost pevnosti na hustotě vyjadřuje dle [14] graf 3.1. Teoretická pevnost švu roste s rostoucí hustotou, skutečná pevnost švu je však nižší díky opotřebení nití a částečné ztrátě jejich pevnosti. Původní pevnost textilie s rostoucí hustotou klesá. Hodnota h_o odpovídá optimální hodnotě hustoty vzhledem k dané textilii.



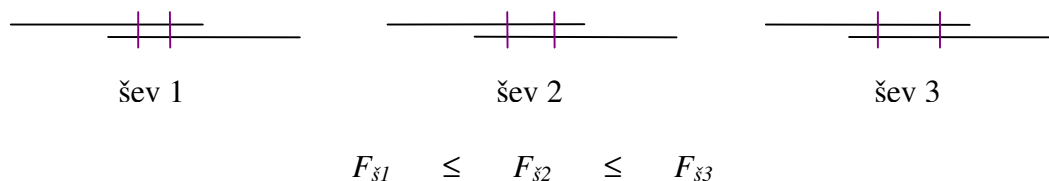
Graf 3.1: Závislost pevnosti švu na hustotě stehů

Šířka švu

Šířka švu ovlivňuje pevnost v závislosti na vlastnostech materiálu. Je dána šířkou švové záložky a vzdáleností stehových řádků u víceřádkových švů.

Šířka švové záložky závisí na odolnosti materiálu proti posuvu nití. Čím je nižší šířka švové záložky, tím je nižší pevnost. Obráceně však úměra platí jen do určité meze odpovídající charakteru materiálu.

Vzdálenost stehových řádků je nutné volit s ohledem na odolnost materiálu proti poškození. Se zvyšující vzdáleností pevnost úměrně roste (obr. 3.9).



Obrázek 3.9: Způsoby provedení švu 2.04.03

Směr šití

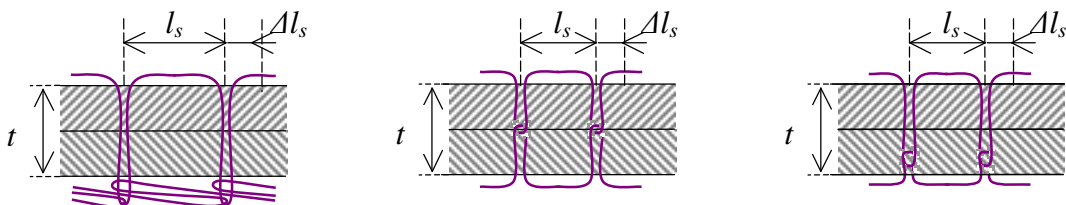
Jelikož je pevnost závislá na vlastnostech materiálu a jelikož jsou textilie materiály anizotropní, je tedy pevnost spoje závislá i na směru šití, resp. na směru spoje vůči struktuře materiálu – tj. směru osnovy (sloupku), útku (řádku), přičemž vrstvy textilií mohou být spojovány ve stejných nebo i různých směrech.

3.2.2.2 Vliv parametrů spojování na podélnou roztažnost spoje

Podélnou roztažnost spoje ovlivňuje směr šití, podmínky při tvorbě stehu a především spotřeba nití ve stehu. Obecně platí, že čím větší je spotřeba nití, tím větší je roztažnost spoje. Parametry spojování ovlivňující spotřebu nitě jsou druh stehu a hustota stehu.

Druh stehu

Musí vyhovovat deformačním vlastnostem textilie. Řetízkové stehy vykazují větší roztažnost díky uložení nití ve spoji. U stehu 301 můžeme roztažnost zvýšit přemístěním vazných bodů na spodní stranu textilie a použitím spodní niti s větší tažností (obr. 3.10c).



Obrázek 3.10: Grafické znázornění prodloužení stehů

a) 401

b) 301

c) 301 s přemístěnými vaznými body

Vyjádříme poměrné prodloužení horní nitě pro vybrané stehy

$$\epsilon_{s401} = \frac{\Delta l_s}{2t + l_s} \quad (3.18)$$

$$\epsilon_{s301} = \frac{\Delta l_s}{t + l_s} \quad (3.19)$$

$$\epsilon_{s301}' = \frac{\Delta l_s}{2t + l_s} \quad (3.20)$$

kde: ϵ_{s401} ... poměrné prodloužení horní nitě ve stehu 401
 ϵ_{s301} ... poměrné prodloužení horní nitě ve stehu 301
 ϵ_{s301}' ... poměrné prodloužení horní nitě ve stehu 301 s přemístěnými vaznými body
 Δl_s ... prodloužení daného stehu [mm]
 l_s ... délka daného stehu [mm]
 t ... tloušťka spojovaných vrstev [mm]

Hustota stehu

S rostoucí hustotou roste spotřeba nití a roste roztažnost spoje. Hustotu je nutné volit podle materiálu, neboť při vysoké hustotě roste nebezpečí poškození materiálu vysokým počtem průpichů a dochází k snížení pevnosti.

Podmínky při tvorbě stehu

Roztažnost ovlivňuje napětí šicích nití při šití. Pro vázané stehy má být napětí spodní nití co nejnižší (asi 0,5 N) a jehelní nití asi 3x vyšší, pak dochází k rovnoměrnému provazování. U řetízkových stehů je třeba jen velmi malé napětí, neboť horní nit není vtahována do materiálu.

Dále ovlivňuje roztažnost spoje podávání šitého materiálu při šití. Nesmí docházet k vytahování materiálu, proto je třeba používat podavače s jemnými zuby, které vystupují jen nízko nad stehovou desku, a přítlak patky snížit na minimum tak, aby docházelo k podávání, ale nedocházelo k nežádoucí deformaci textilie.

Směr šití

Deformační vlastnosti švů závisí na deformačních vlastnostech textilie ve směru šití, které jsou závislé na její struktuře a použitých surovinách. Například u tkanin s plátňovou vazbou se projevuje nejmenší deformace ve směru osnovy, nízká deformace ve směru útku a nejvyšší deformace ve směru kosém.

3.2.3 Způsob namáhání

Způsob namáhání ovlivňuje pevnost spoje při užívání výrobků. Jedná se o faktory dané aplikací výrobků, nelze je ovlivnit při vytváření spojů, ale je třeba tyto faktory zohlednit při testování spojů.

Namáhání je způsobeno různými vlivy vnějšího prostředí, tedy nejen používáním, ale i například povětrnostními vlivy. Znalost jejich pozitivních a negativních stránek dává možnost správně volit parametry materiálu, šicí nitě, technologie zpracování.

V další části textu uvažujme namáhání vyvolané působením vnějších sil.

3.2.3.1 Vliv způsobu namáhání na příčnou pevnost spoje

Příčnou pevnost spoje ovlivňuje především způsob působení síly, směr působící síly a rychlost změny velikosti síly.

Způsob působení síly

Švy jsou obvykle vystaveny opakovanému namáhání, což působí na jejich životnost. Dále mohou být švy vystaveny dlouhodobému působení síly.

V závislosti na způsobu působení síly při namáhání odlišujeme:

- jednorázové namáhání – příčná pevnost je limitovaná absolutní destrukcí (v případě přetrhu textilie), porušením prvního vazebního bodu švu (v případě přetrhu šicí nitě), porušením tkaniny (v případě posunu nití ve švu)
- opakované (cyklické) namáhání – příčná pevnost je funkcí nejen síly, ale i počtu opakování.

Z hlediska času může síla působit jako:

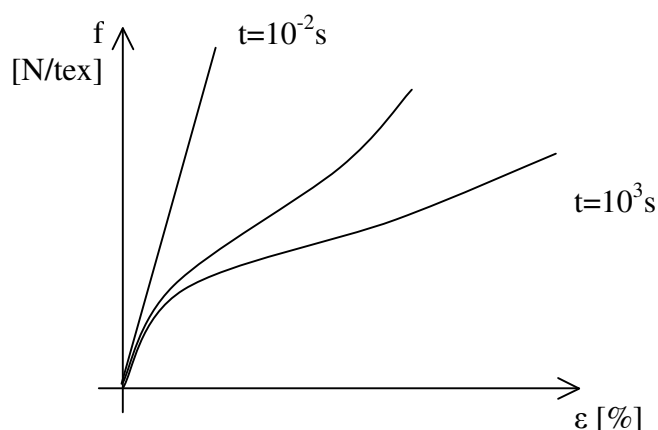
- konstantní – pak dochází ke kríčovému jevu
- nebo může docházet k relaxaci síly – v případě zachování deformace.

Směr působící síly

U výrobků se vyskytují i různě zakřivené švy, u nichž se mění směr působící síly vzhledem ke směru švu. V závislosti na tvaru švu nemusí namáhání působit po celé délce švu jako příčné. Vliv směru působící síly na pevnost švu je možno vyjádřit pomocí polárních diagramů.

Rychlost změny velikosti síly

V [13] je sledován průběh tahové křivky niti v závislosti na rychlosti změny působící síly. Při zkracování doby působení se křivka stává strmější a přechází v přímku (postupně mizí skluzová oblast a narůstá počáteční modul, který je charakteristickým znakem pro elastickou deformaci).



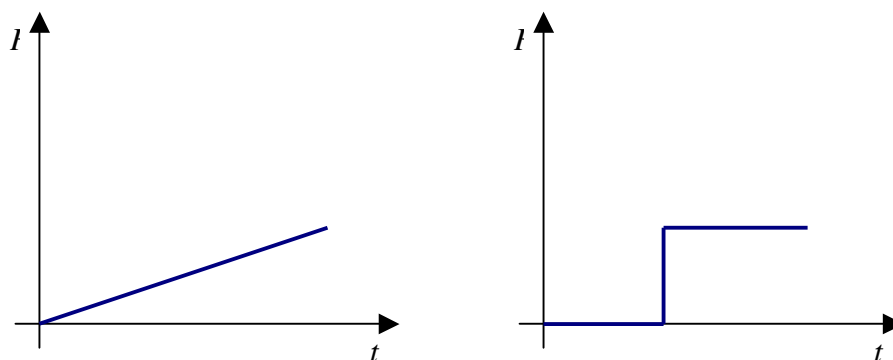
Obrázek 3.11: Schematické znázornění změny tahové křivky niti v závislosti na rychlosti změny působící síly[13]

Pevnost je závislá nejen na velikosti působící síly, ale také na rychlosti změny její velikosti, tzn. na rychlosti, jíž je materiál deformován. Při vyšší rychlosti deformace se dle [12] materiál trhá sice při vyšších hodnotách napětí, ale při nižším protažení, tzn. jeví se jako křehký. Čím více se bude zvyšovat rychlost deformace, tím křehčím se materiál bude jevit.

Mechanické namáhání můžeme definovat v závislosti na rychlosti změny působících sil (obr.3.12) jako:

- quasistatické (působící síla se mění pomalu a spojitě)
- rázové (působící síla se mění skokově).

Rázové namáhání je charakterizováno náhlou změnou rychlostí bodů soustavy ve velmi krátkém čase působením značně velkých sil. Během krátké doby se poloha tělesa téměř nezmění, změní se ale skokem rychlost, hybnost, energie tělesa.



Obrázek 3.12: Schematické znázornění změny síly při namáhání quasistaticém a rázovém

3.2.3.2 Vliv způsobu namáhání na podélnou roztažnost spoje

Podélnou roztažnost spoje ovlivňuje velikost působící síly, doba trvání působení síly, rychlost změny velikosti síly.

Velikost působící síly

Podélná roztažnost je úměrná velikosti působící síly až do porušení prvního vazebního bodu švu.

Doba trvání působení síly

Vzhledem k viskoelastickým vlastnostem textilních materiálů dochází při delším působení síly k poklesu napětí a vzniku trvalých deformací, které snižují podélnou roztažnost při dalším namáhání.

Rychlost změny velikosti síly

Při vysoké rychlosti změny působící síly dochází k vzrůstu napětí tak rychle, že se dle [12] zřejmě nestačí plně rozvinout všechny mechanismy plastické deformace, takže materiál vykazuje nižší protažení.

3.2.3.3 Vliv způsobu namáhání na testování vlastností

Odezvou na namáhání za spolupůsobení determinačních faktorů jsou mechanické vlastnosti materiálů. Kvantitativní úroveň odezvy vyjadřují mechanické charakteristiky, které jsou předmětem mechanických zkoušek.

Druhy zkoušek mechanických vlastností:

- statické zkoušky
 - při kterých zatížení zvětšujeme zvolna do dané hodnoty
 - při namáhání jsou vnější síly v čase neproměnné
 - zatížení působí obvykle minuty, při dlouhodobých zkouškách dny až roky
- quasistatické
 - při kterých zatížení zvětšujeme postupně
 - při namáhání jsou vnější síly v čase proměnné – pomalu, spojitě
 - zatížení působí obvykle do meze pevnosti
- dynamické zkoušky rázové
 - při kterých působí síla nárazově po zlomek sekundy
 - při namáhání jsou vnější síly v čase proměnné – náhle, skokově
- cyklické zkoušky
 - při kterých zatížení zvětšujeme zvolna do dané hodnoty a po té snižujeme
 - proměnné zatížení se opakuje mnoha cykly
 - tzv. zkoušky na únavu materiálu

4. STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SPOJŮ

Stanovení mechanicko-fyzikálních vlastností spojů spadá do širokého okruhu problémů projektování spojů technických konfekcí, které je třeba řešit vzhledem k výrobní náročnosti technických konfekcí a především nezbytné spolehlivosti funkčních vlastností jejich spojů, ale také s přihlédnutím k finančním a časovým nárokům testování.

Stanovení mechanických charakteristik je důležité především z hlediska aplikací technických konfekcí v praxi. Jsou-li tyto výrobky používány, dochází k namáhání textilie a jejích spojů, přičemž mezi nejčastější patří mechanické namáhání v tahu. Proto je nutné znát charakteristiky pevnosti nejen textilie, ale i švů. Jejich stanovení je závislé na způsobu namáhání.

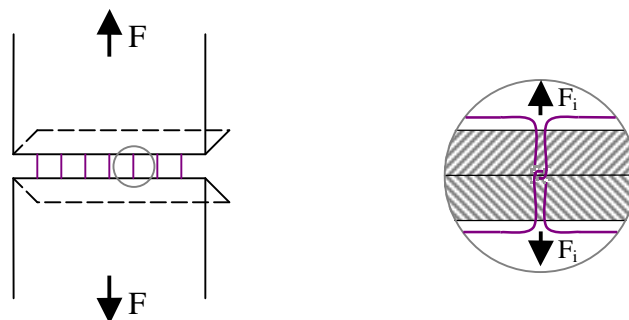
4.1 STANOVENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK PŘI QUASISTATICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ

Stanovit základní vlastnosti spoje lze v zásadě dvěma způsoby – experimentálním měřením pomocí laboratorních vzorků či teoreticky pomocí predikční funkce.

Vyhodnocení pevnosti a tažnosti spoje povede ke stanovení optimálních konstrukčních parametrů spoje podle určitého účelu praktického použití technických konfekčních výrobků s ohledem na řadu specifických požadavků.

4.1.1 Teoretická pevnost při quasistatickém zatěžování

Uvažujme případ příčného namáhání švu na laboratorním vzorku (obr. 4.1). Na spoj působíme kolmo ke směru šití vnější silou (F). Tato síla se v místě spoje rozkládá na složky, které působí v jednotlivých vazných bodech spoje.



Obrázek 4.1: Schematické znázornění namáhání švu v příčném směru

Považujme sílu (F) za výslednici sil (F_i) působících ve vazných bodech spoje. Uvažujme zidealizovaný případ, kdy budou všechny složky síly stejně velké, rovnoběžné s výslednicí. Na každý vazný bod pak teoreticky působí síla (F_i):

$$F_i = \frac{F}{n} \quad (4.1)$$

kde: F celková působící síla [N]
 F_i složka síly F [N]
 n počet vazných bodů

Počet vazných bodů je možno vyjádřit pomocí základních parametrů stehu jako:

$$n = \frac{h}{10}b + 1 \quad (4.2)$$

kde: b šířka vzorku (délka švu) [mm]
 h hustota stehu [cm^{-1}]

Maximální síla ($F_{i \max}$), kterou můžeme na nit působit, je její pevnost v kličce (F_{nk}). Maximální celková síla (F_{\max}), kterou můžeme působit na spoj, pak vyjadřuje teoretickou pevnost švu ($F_{s(t)}$); vztah (4.1) se transformuje na:

$$F_{nk} = \frac{F_{s(t)}}{n} \quad (4.3)$$

kde: F_{nk} ... pevnost nití v kličce [N]
 $F_{s(t)}$... teoretická pevnost švu [N]
 n počet vazných bodů

Teoretická příčná pevnost ve švu je dle [14] maximální hodnota, které je možno dosáhnout. Pro hřbetové švy je dle [14] vyjádřena jako lineární funkce pevnosti nití v kličce a počtu vazných bodů na příslušné délce švu:

$$F_{s(t)} = F_{nk} \cdot n \quad (4.4)$$

Pevnost niti v kličce je dána vztahem (3.2), závisí na koeficientu pevnosti nití v kličce (φ), respektive poměrné pevnosti nití v kličce. Využijeme vztahu (3.3) a pevnost niti v kličce vyjádříme jako:

$$F_{nk} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot F_n \cdot F_{nkp} \quad (4.5)$$

kde: F_{nk} pevnost nitě v kličce [N]
 F_n pevnost nitě v tahu [N]
 F_{nkp} poměrná pevnost nitě v kličce [% z výchozí pevnosti nitě v tahu]

Využijeme-li vztahů (4.2) a (4.5), pak teoretickou příčnou pevnost vyjádříme jako:

$$F_{s(t)} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (h \cdot b + 10) \cdot F_n \cdot F_{nkp} \quad (4.6)$$

Uvedený vztah (4.6) platí pro jednořádkové švy, pro víceřádkové švy bude hodnota teoretické příčné pevnosti vyšší. Počet nosných stehových řádků (resp. druh stehu) charakterizuje dle [14] opravný koeficient α .

$$F_{s(t)} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (h \cdot b + 10) \cdot F_n \cdot F_{nkp} \cdot \alpha \quad (4.7)$$

kde: α ... koeficient švu

Koeficient švu α bude nabývat hodnoty:

$\alpha = 1$ pro jednořádkové švy a nepoužívanější stehy 301

$\alpha > 1$ pro víceřádkové švy

přesné určení není snadné, neboť závisí na druhu a provedení švu a stehu (viz kap. 4.1.3.2)

Skutečná příčná pevnost švu (F_s) je nižší než teoretická, neboť při tvorbě stehu dochází k poklesu pevnosti šicích nití.

$$F_s < F_{s(t)} \quad (4.8)$$

Pokles pevnosti šicích nití charakterizuje koeficient poškození nitě, resp. koeficient zůstatku pevnosti nitě po zašití do spoje. Pro skutečnou příčnou pevnost švu platí:

$$F_s = F_{s(t)} \cdot \psi \quad (4.9)$$

kde: F_s pevnost švu skutečná [N]
 ψ koeficient poškození nitě
 (resp. zůstatku pevnosti nitě po zašití do spoje)

Koeficient poškození nitě je dán vztahem (3.8), závisí na pevnosti nitě po šití ($F_{nš}$) udávané v % z výchozí pevnosti.

Predikční funkce pro teoretické stanovení skutečné pevnosti šitého spoje má tvar:

$$F_s = 2 \cdot 10^{-5} \cdot (h \cdot b + 10) \cdot F_n \cdot F_{nkp} \cdot F_{nš} \cdot \alpha \quad (4.10)$$

kde: F_s pevnost švu skutečná [N]
 F_n pevnost nitě v tahu [N]
 F_{nkp} ... poměrná pevnost nitě v kličce [% z výchozí pevnosti nitě v tahu]
 $F_{nš}$ poměrná pevnost nitě po šití [% z výchozí pevnosti nitě v tahu]
 h hustota stehu [cm^{-1}]
 b šířka vzorku (délka švu) [mm]
 α koeficient švu

Verifikace vztahu je provedena v příloze 1.

Skutečná pevnost švu je dána nejen okamžitou pevností šicích nití, ale také pevností šitého materiálu po šití. To znamená, že predikční funkce stanoví skutečnou pevnost švu pouze za předpokladu, že pevnost textilie (i po šití!) je vyšší.

U technických konfekcí ale často požadujeme, aby pevnost švu byla větší nebo rovná pevnosti nosné textilie. Proto stanovujeme tzv. stupeň účinnosti švu:

$$U = \frac{F_s}{F_t} \cdot 100 \quad (4.11)$$

kde: U stupeň účinnosti švu [%]
 (pro technické konfekce musí nabývat hodnoty vyšší než 100%)
 F_s pevnost švu délky b [N]
 F_t pevnost šitého materiálu šířky b [N]

Pro technické konfekce musí být navíc pevnost šitého materiálu a potažmo pevnost švu stanovena tak, aby převyšovala požadované zatížení výrobku a zajišťovala bezpečný provoz dlouhodobě. Mírou pro stanovení pevnosti je stupeň bezpečnosti, který se udává v %. Stanovuje se empiricky podle zkušeností a je rozdílný v závislosti na druhu výrobku a způsobu namáhání (kolísavé, rázové).

4.1.2 Stanovení modulů rovinné napjatosti v quasistatickém režimu

Definování teoretických závislostí popisujících vlastnosti textilních spojů – anizotropních, nelineárních útvarů – předpokládá stanovení modulů rovinné napjatosti jako veličiny, která charakterizuje odpor proti namáhání pro konkrétní stav napjatosti.

Mechanické vlastnosti švů jsou ovlivňovány jejich strukturou, která je natolik složitá, že jevy nelze exaktně popsat. Je třeba vyjít z přibližného fyzikálního modelu a aplikovat experimentálně-analytickou metodu vycházející z [16]. Stanovení mechanických charakteristik textilie je umožněno náhradou textilie s výraznou strukturou plošným kontinuem bez struktury se stejnými mechanickými vlastnostmi, který předpokládá, že všechny sledované vlastnosti textilie uvnitř infinitesimálního elementu jsou popsány spojitými funkcemi prostorových souřadnic.

Moduly rovinné napjatosti dle [16] závisejí nejen na struktuře textilie, ale také na směru namáhání vzhledem k této struktuře a na rovnoměrnosti rozložení působících sil. Pro určení modulů je třeba znát typ anizotropie plošné textilie, který závisí na symetrii vlastností. Anizotropii charakterizuje tenzor modulů rovinné napjatosti \bar{E}_{ij} , určitá symetrie vlastností zmenšuje počet nezávislých modulů.

Nejobecnějším typem anizotropie plošné textilie je anizotropie jednoklonná (monoklonná) charakterizovaná šesti moduly rovinné napjatosti

$$\bar{E}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \bar{E}_{14} \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} & \bar{E}_{24} \\ \bar{E}_{14} & \bar{E}_{24} & \bar{E}_{44} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Ve zvláštním případě, když bude textilie namáhána v hlavní ose anizotropie, půjde o čtverečnou (tetragonální) anizotropii, charakterizovanou maticí modulů

$$\bar{E}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \bar{E}_{14} \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{11} & -\bar{E}_{14} \\ \bar{E}_{14} & -\bar{E}_{14} & \bar{E}_{44} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

V případě, že bude textilie namáhána rovnoměrně rozdělenými poměrnými silami v hlavních směrech struktury, půjde o anizotropii ortotropní (kosočtverečnou rombicovou), charakterizovanou maticí modulů

$$\bar{E}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & 0 \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{E}_{44} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

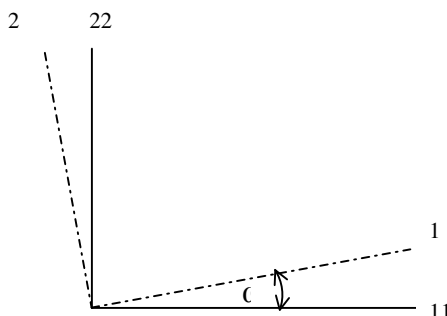
nebo ve zvláštním případě (když bude textilie namáhána v hlavních směrech struktury a v hlavní ose anizotropie) půjde o šesterečnou (hexagonální) anizotropii, charakterizovanou maticí modulů

$$\bar{E}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & 0 \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(\bar{E}_{11} + \bar{E}_{12}) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Pro určení anizotropie je třeba stanovit **polohu hlavní osy anizotropie**, na které je skutečná poměrná smyková síla nulová (viz obr. 4.2)

$$\omega = \frac{1}{2} \arctg \frac{2s_{12}}{s_{11} - s_{22}} \quad (4.16)$$

kde: ω je úhel, který svírá hlavní osa anizotropie s osou zatěžování
 s_{12}, s_{11}, s_{22} jsou složky Cauchyho tenzoru skutečných poměrných sil



Obrázek 4.2: Označení os: 11,22 – osy zatěžování
1,2 – hlavní osy anizotropie

Pro určení modulů napjatosti se využívá Hookeův zákon v tenzorovém vyjádření, který definuje vztah mezi tenzorem deformace a tenzorem napětí.

Tenzory deformace se určují stanovením posuvů částic při přetvoření. Jsou založeny na rozdílu délek infinitesimální úsečky ve dvou konfiguracích (v Eulerově a Lagrangeově popisu).

Tenzory napětí jsou definovány prostřednictvím Cauchyho tenzoru skutečných poměrných sil.

Je známo sedm tenzorů deformace (z nich dva nejsou měrami deformace, protože nesplňují podmínku nezávislosti na pohybu tělesa jako tuhého celku) a sedm tenzorů napětí, které jsou rozdílné. K identifikaci modulů je nutno zvolit jejich vhodnou kombinaci - tzv. energeticky konjugovanou dvojici (skalární součin tenzorů dává mechanickou práci). Je známo pět konjugovaných dvojic (nejznámější je první, nejuniverzálnější je čtvrtá konjugovaná dvojice):

2. Piola-Kirchhoffův tenzor napětí – Greenův-Lagrangeův tenzor deformace

$$J F^I \Sigma (F^I)^T \Leftrightarrow \frac{1}{2} (\Delta^2 - I) \quad (4.17)$$

Hillův tenzor napětí – Almansiho tenzor deformace

$$F^T J \Sigma F \Leftrightarrow \frac{1}{2} (I - \Delta^2) \quad (4.18)$$

Sdružený tenzor napětí – logaritmický tenzor deformace

$$R^T J \Sigma R \Leftrightarrow \ln \Delta \quad (4.19)$$

Biotův tenzor napětí – Biotův tenzor protažení

$$\frac{1}{2} (F^{-1} J \Sigma R + R^T J \Sigma (F^{-1})^T) \Leftrightarrow (\Delta - I) \quad (4.20)$$

Černychův tenzor napětí – inverzní Biotův tenzor protažení

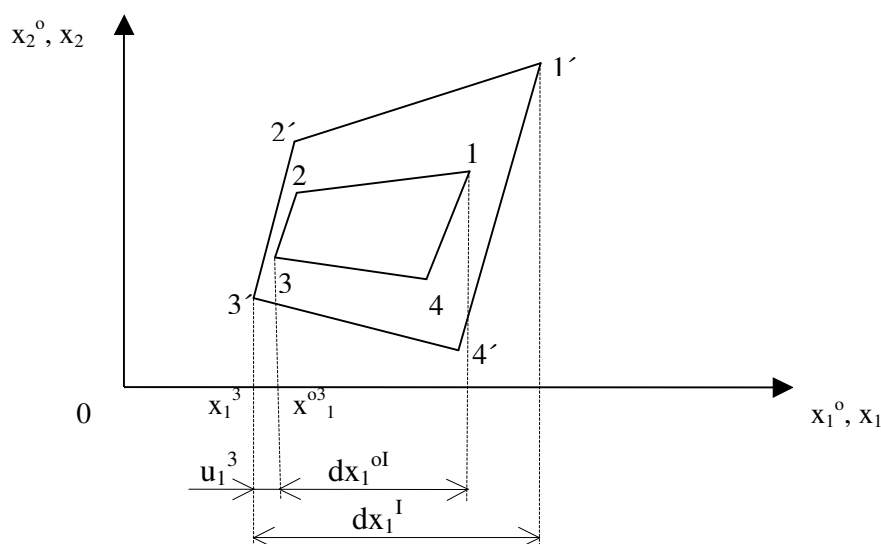
$$\frac{1}{2} (F^T J \Sigma R + R^T J \Sigma F) \Leftrightarrow (I - \Delta^I) \quad (4.21)$$

- kde: F materiálový deformační gradient
 v ploše představuje čtvercovou matici druhého stupně složenou z partiálních derivací prostorových souřadnic podle materiálových souřadnic ($F = x_{i,j}$)
 F^{-1} prostorový deformační gradient (inverzní matice k matici materiálového deformačního gradientu)
 J jakobián transformace, resp. determinant matice F
 R tenzor rotace, určuje se z pravé polární dekompozice tenzoru F
 Σ Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil (viz kap. 4.1.2.2)
 Δ tenzor protažení (viz kap. 4.1.2.1)

4.1.2.1 Závislosti pro výpočet tenzorů deformace

Tenzor deformace je vždy tříosý, avšak dochází-li k deformacím v rovině, může být příčná změna rozměrů zanedbatelná.

Vycházíme z experimentálně stanovených posuvů sledovaných bodů plošné textilie (obr. 4.3). Označme vrcholy segmentu experimentálního vzorku 1 – 4 (jejich souřadnice jsou materiálovými souřadnicemi x_i^0) a vrcholy deformovaného segmentu 1' – 4' (jejich souřadnice jsou prostorovými souřadnicemi x_i). Určíme rozdíl souřadnic blízkých bodů - koncových bodů úhlopříček segmentu Δx_i^{or} a Δx_i^r .



Obrázek 4.3: Deformace segmentu experimentálního vzorku

Ve vztahu mezi Eulerovými a Lagrangeovými souřadnicemi, který platí i pro diferenciály, nahradíme diferenciál diferencí (u_i označuje posuv)

$$dx_i = dx_i^{\circ} + du_i \quad (4.22)$$

$$dx_i = dx_i^{\circ} + u_{i,j} dx_j^{\circ} \quad (4.23)$$

$$\Delta x_i^r = \Delta x_i^{or} + u_{ij} \Delta x_j^{or} \quad (4.24)$$

kde: Δx_i^r je rozdíl prostorových souřadnic koncových bodů r-té úhlopříčky na i-té ose, Δx_i^{or} (Δx_j^{or}) je rozdíl materiálových souřadnic koncových bodů r-té úhlopříčky na i-té (j-té) ose.

Z diferenční rovnice (4.24) dostaneme soustavu rovnic:

$$\Delta x_1^I = (1 + u_{11}) \Delta x_1^{oI} + u_{12} \Delta x_2^{oI} \quad (4.25)$$

$$\Delta x_1^{II} = (1 + u_{11}) \Delta x_1^{oII} + u_{12} \Delta x_2^{oII} \quad (4.26)$$

$$\Delta x_2^I = u_{21} \Delta x_1^{oI} + (1 + u_{22}) \Delta x_2^{oI} \quad (4.27)$$

$$\Delta x_2^{II} = u_{21} \Delta x_1^{oII} + (1 + u_{22}) \Delta x_2^{oII} \quad (4.28)$$

Jejím řešením je materiálový gradient posuvu (matice složená z parciálních derivací posuvů podle materiálových souřadnic)

$$u_{ij} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

Na jeho základě stanovíme dle [16] materiálový deformační gradient

$$F = \begin{pmatrix} 1 + u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & 1 + u_{22} \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

a tenzor protažení prostřednictvím polárního rozkladu ze vztahu

$$\Delta = (F^T F)^{1/2} \quad (4.31)$$

Pro jednoosou napjatost v hlavních směrech struktury (která bude uplatněná v experimentální části) budou veličiny u_{12} a u_{21} velmi malé (jedná se o chyby měření, které vznikají nedokonalým odečítáním souřadnic vrcholů segmentu experimentálního vzorku). Eliminujeme je vztahy (pro hlavní hodnoty tenzoru):

$$u_{11}^* = \frac{1}{2}(u_{11} + u_{22}) + \frac{1}{2}\sqrt{(u_{11} - u_{22})^2 + 4u_{12}u_{21}} \quad (4.32a)$$

$$u_{22}^* = \frac{1}{2}(u_{11} + u_{22}) - \frac{1}{2}\sqrt{(u_{11} - u_{22})^2 + 4u_{12}u_{21}} \quad (4.32b)$$

Materiálový deformační gradient má pro jednoosou napjatost tvar:

$$F = \begin{pmatrix} 1+u_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & 1+u_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & 1+u_{33} \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

kde složku u_{33} lze určit ze vztahu pro smykový modul:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_4 &= \frac{\bar{c}_i}{\gamma_i} \\ \text{kde: } \bar{c}_i &= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{\bar{c}_{11}^2 + \bar{c}_{11}^2} \\ \gamma_i &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Jakobián nabývá hodnoty:

$$J = (1+u_{11}^*)(1+u_{22}^*)(1+u_{33}) \quad (4.35)$$

Prostorový deformační gradient má pro jednoosou napjatost tvar:

$$F^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+u_{11}^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1+u_{22}^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1+u_{33}} \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

Dále platí:

$$F = F^T \quad (4.37)$$

$$F^{-1} = F^{-T} \quad (4.38)$$

Z polární dekompozice platí:

$$F = R U \quad (4.39)$$

$$U^2 = F^T F \quad (4.40)$$

$$U = F \quad (4.41)$$

pak tenzor rotace:

$$R = I \quad (4.42)$$

Tenzor protažení je pro jednoosou napjatost shodný s materiálovým deformačním gradientem:

$$\Delta = F \quad (4.43)$$

4.1.2.2 Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil

Je třeba znát zatěžující síly, které deformovaly vzorek textilie. Zavádíme poměrné síly s_{ij} jako síly působící v ploše textilie na jednotku délky. Neuvažujeme tloušťku textilie a přejdeme k tenzorům v ploše (čtvercová matice se transformuje na matici druhého stupně, jakou je deformační tenzor). Dále zavádíme Cauchyho symetrický tenzor skutečných poměrných sil Σ , který vyjadřuje okamžité síly vztažené k okamžité konfiguraci.

V maticovém zápisu v souřadném systému 11,22 má tvar:

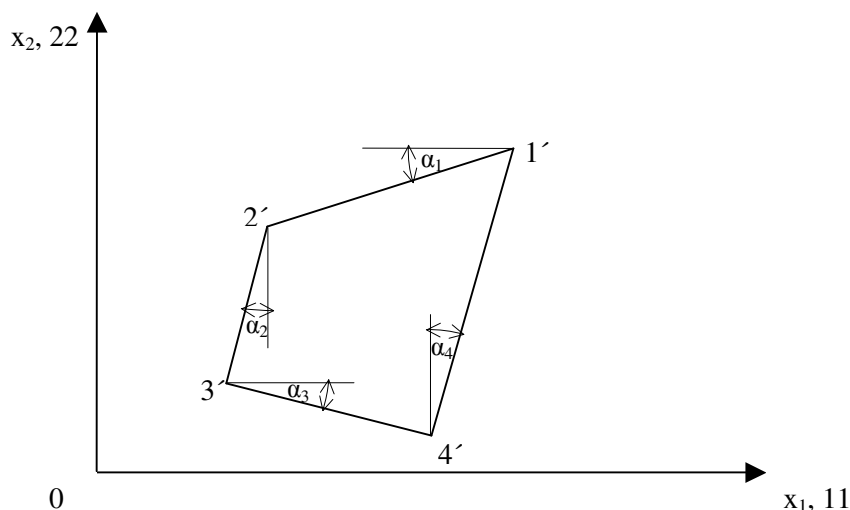
$$\Sigma = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{12} & s_{22} \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

Složky tenzoru určíme z podmínek rovnováhy přetvořeného segmentu a známých hodnot zatěžujících sil. Vyjdeme ze statických rovnic rovnováhy (v rovině se jedná o tři rovnice – dvě do směrů souřadnicových os a jedna momentová) a tenzorů poměrných sil elementů rovnoběžných s okrají segmentu vzorku.

K sestavení statických rovnic rovnováhy je třeba znát geometrii přetvořeného segmentu (obr. 4.4) – délky stran přetvořeného segmentu (označme l_{12} , l_{23} , l_{34} , l_{14}) a pootočení stran segmentu vzhledem k osám 11, 22 (označme úhly α_1 , α_2 , α_3 , α_4), pro něž platí vztahy:

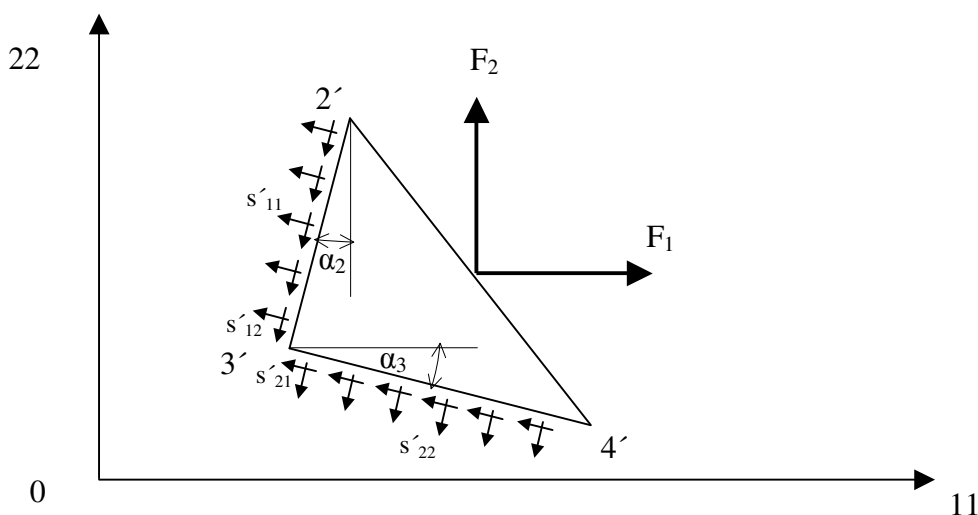
$$\begin{aligned} l_{12} &= \sqrt{(x_1^1 - x_1^2)^2 + (x_2^1 - x_2^2)^2} \\ l_{23} &= \sqrt{(x_1^2 - x_1^3)^2 + (x_2^2 - x_2^3)^2} \\ l_{34} &= \sqrt{(x_1^3 - x_1^4)^2 + (x_2^3 - x_2^4)^2} \\ l_{14} &= \sqrt{(x_1^1 - x_1^4)^2 + (x_2^1 - x_2^4)^2} \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \frac{x_2^1 - x_2^2}{l_{12}} & \cos \alpha_1 &= \frac{x_1^1 - x_1^2}{l_{12}} \\ \sin \alpha_2 &= \frac{x_1^2 - x_1^3}{l_{23}} & \cos \alpha_2 &= \frac{x_2^2 - x_2^3}{l_{23}} \\ \sin \alpha_3 &= \frac{x_2^3 - x_2^4}{l_{34}} & \cos \alpha_3 &= \frac{x_1^4 - x_1^3}{l_{34}} \\ \sin \alpha_4 &= \frac{x_1^1 - x_1^4}{l_{14}} & \cos \alpha_4 &= \frac{x_2^1 - x_2^4}{l_{14}} \end{aligned} \quad (4.46)$$



Obrázek 4.4: Geometrie segmentu experimentálního vzorku

Sestavíme statické rovnice segmentu textilie (obr. 4.5). Složky poměrných sil, jež působí na segment jsou označeny čárkou.



Obrázek 4.5: Silové poměry na segmentu

Rovnice rovnováhy do směru 11:

$$F_1 - s_{11}' l_{23} \cos \alpha_2 - s_{12}' l_{23} \sin \alpha_2 - s_{22}' l_{34} \sin \alpha_3 - s_{21}' l_{34} \cos \alpha_3 = 0 \quad (4.47)$$

Rovnice rovnováhy do směru 22:

$$F_2 + s_{11}' l_{23} \sin \alpha_2 - s_{12}' l_{23} \cos \alpha_2 - s_{22}' l_{34} \cos \alpha_1 + s_{21}' l_{34} \sin \alpha_1 = 0 \quad (4.48)$$

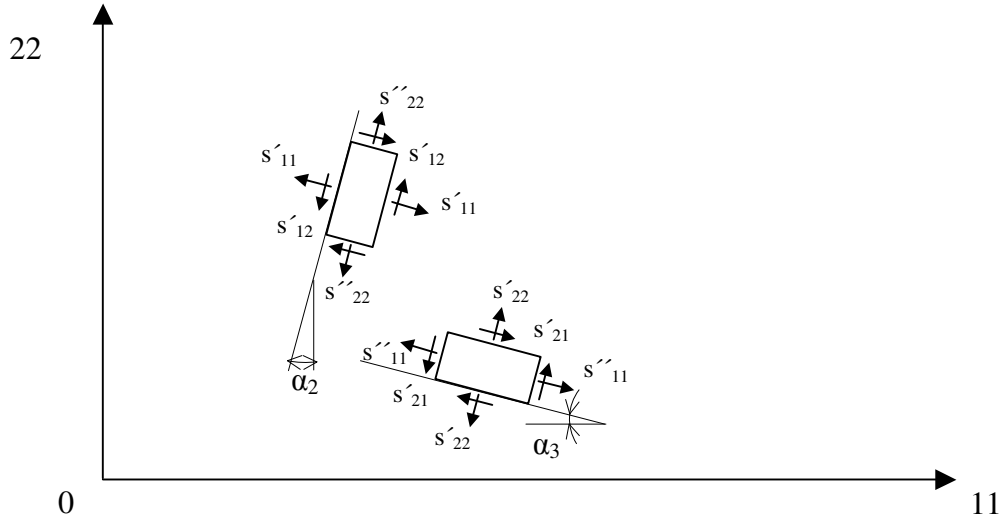
Momentová rovnice k bodu 3:

$$F_1 \left[\frac{1}{2} (x_2^2 - x_2^4) + x_2^4 - x_2^3 \right] - F_2 \left[\frac{1}{2} (x_1^4 - x_1^2) + x_1^2 - x_1^3 \right] - \frac{1}{2} s_{11}' l_{23}^2 + \frac{1}{2} s_{22}' l_{34}^2 = 0 \quad (4.49)$$

po úpravě:

$$F_1 \left[\frac{1}{2} (x_2^2 + x_2^4) - x_2^3 \right] - F_2 \left[\frac{1}{2} (x_1^4 + x_1^2) - x_1^3 \right] - \frac{1}{2} s_{11}' l_{23}^2 + \frac{1}{2} s_{22}' l_{34}^2 = 0$$

Určíme tenzory poměrných sil pro elementy rovnoběžné s okraji segmentu vzorku (obr. 4.6). Složky poměrných sil, jež působí na element jsou označeny dvěma čárkami.



Obrázek 4.6: Silové poměry na elementech rovnoběžných s okraji vzorku

Tenzory poměrných sil pro elementy v maticovém vyjádření:

$$S'_1 = \begin{pmatrix} s'_{11} & s'_{12} \\ s'_{12} & s'_{22} \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

$$S'_2 = \begin{pmatrix} s'_{11} & s'_{21} \\ s'_{21} & s'_{22} \end{pmatrix}$$

Pootočením těchto elementů do směrů 11, 22 získáme tenzory skutečných poměrných sil:

$$S_I = A_I S'_I A_I^T \quad (4.51)$$

$$S_2 = A_2 S'_2 A_2^T$$

kde:

$$A_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (4.52)$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_3 & \sin \alpha_3 \\ -\sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 \end{pmatrix}$$

Pro Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil platí:

$$\Sigma = S_I = S_2 \quad (4.53)$$

Porovnáním složek tenzorů S_1 , S_2 (u smykové poměrné síly s opačným znaménkem) dostaneme složky Cauchyho tenzoru skutečných poměrných sil.

$$\begin{aligned}
 s_{11} &= s_{11}' \cos^2 \alpha_2 + s_{12}' \sin 2\alpha_2 + s_{22}'' \sin^2 \alpha_2 \\
 &= s_{11}'' \cos^2 \alpha_3 + s_{21}' \sin 2\alpha_3 + s_{22}' \sin^2 \alpha_3 \\
 s_{22} &= s_{11}' \sin^2 \alpha_2 - s_{12}' \sin 2\alpha_2 + s_{22}'' \cos^2 \alpha_2 \\
 &= s_{11}'' \sin^2 \alpha_3 - s_{21}' \sin 2\alpha_3 + s_{22}' \cos^2 \alpha_3
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

$$\begin{aligned}
 -s_{12} &= \frac{1}{2} (s_{22}'' - s_{11}') \sin 2\alpha_2 + s_{12}' (\cos^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_2) \\
 &= \frac{1}{2} (s_{22}' - s_{11}'') \sin 2\alpha_3 + s_{21}' (\cos^2 \alpha_3 - \sin^2 \alpha_3)
 \end{aligned}$$

Spolu se statickými rovnicemi rovnováhy tak získáme šest rovnic o šesti neznámých, ze kterých plyne Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil.

Pro jednoosou napjatost v hlavních směrech struktury bude mít Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil jen jednu nenulovou složku:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} s_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.55}$$

kterou určíme jako poměr jediné působící síly F_1 a skutečné šířky deformovaného experimentálního vzorku textilie b :

$$s_{11} = \frac{F_1}{b} \tag{4.56}$$

kde b je dána vztahem (4.27) jako rozdíl okrajových bodů vzorku textilie. Po úpravě vyjde:

$$s_{11} = \frac{F_1}{b^o (1 + u_{22}^*)} \tag{4.57}$$

kde b^o je počáteční šířka experimentálního vzorku.

4.1.2.3 Určení tenzoru modulů rovinné napjatosti

Tenzor modulů rovinné napjatosti určíme ze soustavy rovnic Hookeova zákona a z dalších závislostí pro moduly rovinné napjatosti. Tenzor závisí na typu anizotropie textilie, v obecném případě obsahuje šest různých modulů rovinné napjatosti. Zatěžujeme-li textilií v hlavních směrech struktury (a je-li smyková síla nulová nebo zanedbatelná), půjde o ortotropii charakterizovanou čtyřmi moduly.

Hookeův zákon definuje vztah mezi tenzorem modulů pružnosti (v tomto případě tenzorem modulů rovinné napjatosti \bar{E}), tenzorem napětí (v tomto případě tenzorem poměrných sil S) a tenzorem deformace D a předpokládá využití vhodné konjugované dvojice. Vztah můžeme zapsat jen třemi rovnicemi, neboť textilií nemůžeme zatěžovat nezávisle ve dvou nebo více souřadných systémech, aniž by se nezměnily moduly. Z těchto rovnic získáme tři nezávislé moduly rovinné napjatosti.

Hookeův zákon obecně vyjádřený k osám zatěžování v maticovém tvaru:

$$\begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{22} \\ c_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \bar{E}_{14} \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} & \bar{E}_{24} \\ \bar{E}_{14} & \bar{E}_{24} & \bar{E}_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (4.58a)$$

ve složkách dostaneme:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \bar{E}_{11}\varepsilon_{11} + \bar{E}_{12}\varepsilon_{22} + 2\bar{E}_{14}\varepsilon_{12} \\ c_{22} &= \bar{E}_{12}\varepsilon_{11} + \bar{E}_{22}\varepsilon_{22} + 2\bar{E}_{24}\varepsilon_{12} \\ c_{12} &= \bar{E}_{14}\varepsilon_{11} + \bar{E}_{24}\varepsilon_{22} + 2\bar{E}_4\varepsilon_{12} \end{aligned} \quad (4.59a)$$

V případě, že se realizuje anizotropie typu ortotropie, redukuje se počet rovnic Hookeova zákona na dvě. Pro jednoosou napjatost v hlavních směrech struktury budou mít rovnice tvar:

$$\begin{pmatrix} c_{11} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & 0 \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{E}_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.58b)$$

ve složkách dostaneme:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \bar{E}_{11}\varepsilon_{11} + \bar{E}_{12}\varepsilon_{22} \\ 0 &= \bar{E}_{12}\varepsilon_{11} + \bar{E}_{22}\varepsilon_{22} \end{aligned} \quad (4.59b)$$

Zvolíme Biotovu konjugovanou dvojici a ze vztahů (4.20) určíme tenzor poměrných sil S_B a tenzor protažení ε^P :

$$S_B = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{F_1(1+u_{33})}{b^o} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.60)$$

$$(4.61)$$

$$\varepsilon^P = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & u_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & u_{33} \end{pmatrix}$$

Složku odpovídající příčné změně rozměrů lze zanedbat a využít jen

$$\bar{c}_{11} = \frac{F_1}{b^o} \quad (4.62)$$

nebo složkou $(1+u_{33})$ vynásobit hledané moduly až dodatečně.

V obecném případě máme tři rovnice pro šest neznámých, v případě ortotropie máme dvě rovnice pro čtyři neznámé moduly. Je třeba stanovit další vztahy.

Z transformačních vztahů pro úhel ω a podmínky nezávislosti modulu \bar{E}_4 na směru získáme vztahy, které sníží počet nezávislých modulů:

$$\bar{E}_{24} = -\bar{E}_{14} + \frac{1}{2}(\bar{E}_{11} - \bar{E}_{22}) \operatorname{tg} 2\omega \quad (4.63)$$

$$\bar{E}_4 = \frac{1}{4}(\bar{E}_{11} + \bar{E}_{22} - 2\bar{E}_{12}) - (\bar{E}_{14} - \bar{E}_{24}) \operatorname{cotg} 4\omega \quad (4.64)$$

Pro \bar{E}_{12} platí závislost (po dosazení do vztahů 4.59, 4.63, 4.64 vede k nelineární soustavě rovnic):

$$\bar{E}_{12} = \pm \sqrt{\bar{E}_{11} \bar{E}_{22}} \mu \quad (4.65)$$

kde μ je zobecnělé Poissonovo číslo, které se určuje jako geometrická střední hodnota Poissonových čísel μ_{12}, μ_{21} dle vztahu:

$$\mu = \sqrt{\mu_{12} \mu_{21}} \quad (4.66)$$

Poissonova čísla μ_{12}, μ_{21} jsou určena jednoosými napjatostmi vzorku textlie ve směrech 11,22 jako záporný podíl zúžení v jednom směru (11, 22) ku roztažení v druhém směru (22, 11).

Pro jednoosou napjatost vyjdeme ze vztahů:

$$\begin{aligned} \bar{E}_4 &= \frac{\bar{E}_{11} \bar{E}_{22} - \bar{E}_{12}^2}{\bar{E}_{11} + \bar{E}_{22} + 2\bar{E}_{12}} \\ \bar{E}_4 &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{4}(\bar{E}_{11} + \bar{E}_{22} - 2\bar{E}_{12}) + \bar{E}_4 \right] \end{aligned} \quad (4.67)$$

Moduly rovinné napjatosti musí dle [16] splňovat podmínky:

$$\bar{E}_{11} > 0, \bar{E}_{22} > 0, \bar{E}_4 > 0, |\bar{E}_{12}| < \sqrt{\bar{E}_{11} \bar{E}_{22}} \quad (4.68)$$

4.1.3 Experimentální identifikace quasistatických charakteristik

Experimentální identifikace vychází z mechanických zkoušek, jejichž výstupem jsou materiálové charakteristiky, které vyjadřují kvantitativní úroveň odezvy na mechanické namáhání.

Při quasistatických zkouškách se zkušební vzorky zatěžují silou, která se zvětšuje postupně, rychlostí menší než je rychlost šíření plastických deformací za normálních podmínek, až do porušení zkoušeného materiálu.

V této části práce nejde o pouhé vyšetřování mechanicko-fyzikálních charakteristik spoje pro konkrétní laboratorní vzorky, ale především jde o sledování vlivu struktury spoje na tyto charakteristiky a to v závislosti na způsobu namáhání. Bude vyšetřován vliv determinačních faktorů na koeficient švu, který vychází z teoretických předpokladů a bude verifikován experimentálně. Dále bude vyšetřován vliv struktury spoje a směru namáhání na moduly rovinné napjatosti, které budou sledovány na vzorcích namáhaných jednoosou napjatostí.

4.1.3.1 Metody zjišťování pevnosti a tažnosti

Metody pro experimentální zjišťování mechanických charakteristik plošných textilií jsou normovány – např.:

- ČSN EN ISO 13934-1,2 – norma pro zjišťování tahových vlastností (pevnost, tažnost)
- ČSN EN ISO 13937-1,2,3 – norma pro zjišťování vlastností při dotržení
- ČSN EN ISO 13938-1,2 – norma pro zjišťování vlastností při protlaku
- ČSN EN 14704-1,2,3 – norma pro zjišťování pružnosti
- ČSN 80 0858 – norma pro zjišťování tuhosti a pružnosti
- ČSN 80 0810 – norma pro zjišťování pevnosti a tažnosti pletenin (již neplatná)

Pro experimentální zjišťování pevnosti švu jsou také stanoveny normy (s mezinárodní platností):

- ČSN EN ISO 13935-1,2 – Zjišťování maximální síly do přetrhu švu
- ČSN EN ISO 13936-1,2,3 – Zjišťování odolnosti tkanin proti posuvu nití ve švu

Pro experimentální zjišťování tažnosti švu není stanovena norma. Návrh metody pro zjišťování tažnosti je uveden dále.

Metody pro zjišťování tahových vlastností švu určují postup zjišťování **maximální síly a maximální tažnosti**. Měření je prováděno na zkušebním vzorku, na dynamometru, za přesně definovaných podmínek (viz [17,18]) – jmenovitě:

- rychlost posuvu čelistí
- rozměry zkušebních vzorků
- postup zhotovení zkušebních vzorků
- umístění vzorku do čelistí
- upínací délka

Měření pevnosti textilie nebo švu je standardně prováděno upnutím vzorku do čelistí tak, aby působící síla měla směr kolmý na strukturu textilie či šev – je zjišťována příčná pevnost, resp. *příčná pevnost švu*.

Princip:

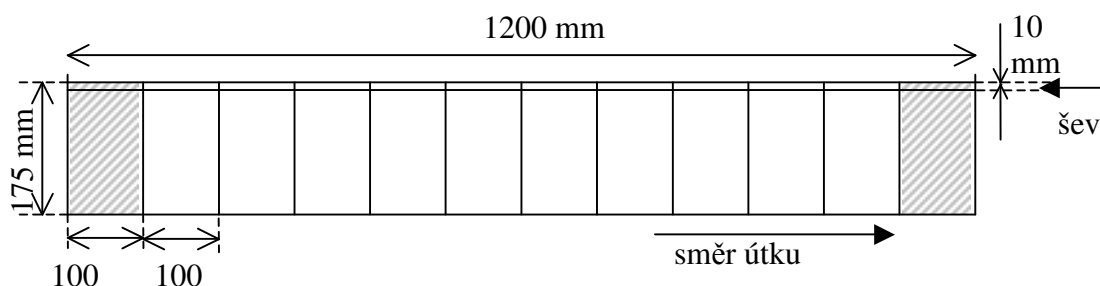
Na zkušební vzorek plošné textilie o stanovených rozměrech se švem uprostřed se působí tahovou silou s konstantním přírůstkem prodloužení, zaznamenává se maximální síla nutná k destrukci spoje.

Parametry měření viz tabulka 4.1.

Příprava vzorků:

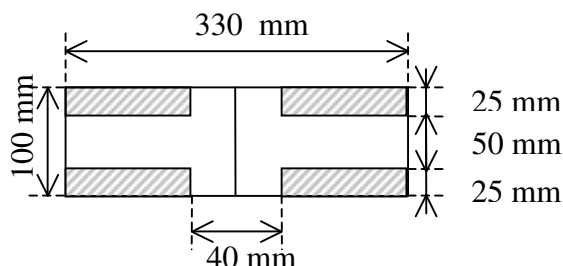
Z plošné textilie je vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech minimálně 250mm x 700mm (event. 350mm x 1200mm v závislosti na upínací délce a počtu zkušebních vzorků) tak, že delší strana je položena ve směru struktury (osnovy, útku). Vzorek je v polovině přeložen (tak, aby hrana skladu byla rovnoběžná s delší stranou vzorku) a přestřižen. V tomto směru se zhotovuje požadovaný šev. Šití musí být rovné a jednotlivé nitě musí být dokonale provázány.

Z obou bočních stran laboratorního vzorku (obr. 4.7) je odstřiženo 100mm do odpadu (tyto části se nehodnotí z důvodu zrychlení a zpomalení šicího stroje při rozjezdu a dojezdu). Ze zbývajících částí je pro každý experiment připravena sada minimálně pěti (nejčastěji deseti) zkušebních vzorků, které jsou vystřižením upraveny na požadovaný tvar.



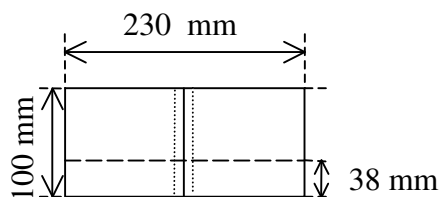
Obrázek 4.7: Laboratorní vzorek pro příčné namáhání

Při metodě Strip se každý zkušební vzorek čtyřikrát nastříhne ve vzdálenosti 20mm od švu do hloubky 25mm a zbytek materiálu se po osnově odstříhne, tak aby skutečná šířka vzorku byla 50mm (obr. 4.8).



Obrázek 4.8: Zkušební vzorek pro zkoušku metodou Strib

Při metodě Grab je na každém vzorku vyznačena referenční linie ve vzdálenosti 38mm od jednoho okraje, k této linii se přikládá okraj čelisti (obr. 4.9).



Obrázek 4.9: Zkušební vzorek pro zkoušku metodou Grab

Pro **měření tažnosti** švu využijeme upnutí vzorku do čelistí tak, aby působící síla měla směr shodný se švem – jedná se o návrh zjišťování *podélné tažnosti švu*.

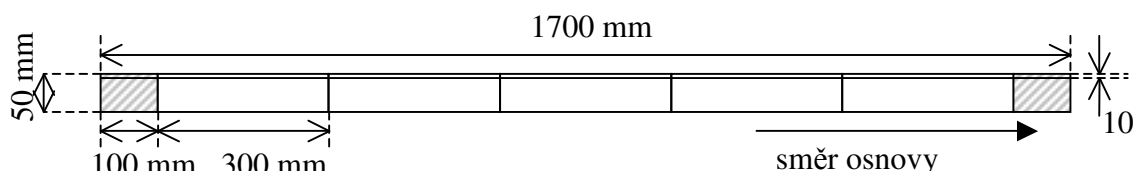
Princip:

Na zkušební vzorek plošné textilie o stanovených rozměrech se švem uprostřed se působí tahovou silou s konstantním přírůstkem prodloužení, zaznamenává se maximální deformace při přetrhu první nitě. Parametry měření viz tabulka 4.1.

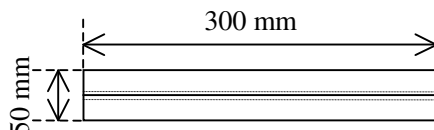
Příprava vzorků:

Z plošné textilie je vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech minimálně 1400mm x 100mm (event. 1700mm x 100mm v závislosti na šířce textilie) tak, že delší strana je položená ve směru struktury (osnovy, útku). Vzorek je v polovině přeložen (tak, aby hrana skladu byla rovnoběžná s delší stranou vzorku) a přestřižen. V tomto směru se zhotovuje požadovaný šev. Šití musí být rovné a jednotlivé nitě musí být dokonale provázány.

Z obou bočních stran laboratorního vzorku (obr. 4.10) je odstřiženo 100mm do odpadu (tyto části se nehodnotí). Ze zbývajících částí je pro každý experiment připravena sada 5 (event. pouze 4) zkušebních vzorků, které jsou vystřižením upraveny na šířku 50mm tak, aby šev byl ve středu vzorku, rovnoběžně s okrajem (obr. 4.11).



Obrázek 4.10: Laboratorní vzorek pro podélné namáhání



Obrázek 4.11: Zkušební vzorek pro zkoušku podélné tažnosti

Tabulka 4.1: Parametry měření pevnosti a roztažnosti švu

parametry měření	metoda Strip	metoda Grab	podélná tažnost
rychlost posuvu čelistí	100 mm/min	50 mm/min	50 mm/min
upínací délka	200 mm	100 mm	200 mm

4.1.3.2 Verifikace koeficientu švu

Pro teoretické stanovení skutečné pevnosti šitého spoje je nutné znát koeficient švu. Stanovení přesné a obecně platné hodnoty koeficientu švu matematického modelu pro predikci skutečné pevnosti švu není možné z důvodu velké variabilnosti využitelných stehů a švů jakožto i jejich parametrů jako ovlivňujících činitelů.

Vyjdeme z předpokladu (viz kap. 4.1.1), že koeficient švu α bude nabývat hodnoty

- $\alpha = 1$ pro jednořádkové hřbetové švy se stehy dvounitnými vázanými
- $\alpha > 1$ pro víceřádkové švy:
 - pro dvouřádkové švy bude $1 < \alpha < 2$, jelikož se zatížení nevětví do obou řádků stejně, bude pro
 - hřbetové dvouřádkové švy koef. α spíše roven 1
 - přeplátované dvouřádkové švy koef. α spíše roven 2
- $\alpha \neq 1$ pro jiné stehy:
 - u řetízkových stehů bude docházet k složitějšímu namáhání než v kličce
 - pro jednonitné řetízkové stehy bude $\alpha < 1$, jelikož zatížení přenáší nižší počet nití
 - pro vícenitné stehy bude $\alpha > 1$, jelikož zatížení přenáší vyšší počet kliček nití

Jak bylo ukázáno v kapitole 4.1.1, je teoretická pevnost švu dána okamžitou pevností šicích nití v kličce (F_{nk}) sníženou o poškození nitě při šití (ψ), násobenou počtem vazných bodů (n) a koeficientem švu (α):

$$F_s = F_{nk} \cdot \psi \cdot n \cdot \alpha \quad (4.69)$$

Použitelné metody ověřování správnosti předpokladu:

1. metoda:

Koeficient α je možné stanovit z matematického modelu pro predikci skutečné pevnosti švu ze známé hodnoty pevnosti švu, pevnosti niti v kličce a koeficientu poškození nitě při šití.

Pevnost švu lze stanovit experimentálně normovanými metodami [17,18].

Pevnost niti v kličce lze stanovit experimentálně, mohla by být součástí specifikace vlastností šicích nití v materiálové dokumentaci výrobců (tzv. materiálový list). Doplnkové měření koeficientu pevnosti niti v kličce viz příloha 3.

Koeficient poškození (resp. poměrnou pevnost nitě po šití) uvádí někteří výrobci šicích nití v materiálových listech, případně lze stanovit experimentálně porovnáním pevnosti nitě před a po šití. Doplnkové měření koeficientu poškození viz příloha 4.

2. metoda

Nejpřístupnější metodou, jak odhadnout koeficient švu α charakterizující danou konfiguraci textilie a nití je simulace mechanického namáhání různě provedených spojů.

Metoda je založena na předpokladu, že hodnota koeficientu α pro základní šev – tj. jednořádkový hřbetový šev tvořený stehem dvounitným vázaným – je rovna 1.

Porovnáním pevnosti základního švu $F_{\dot{s}z}$ a vyšetřovaného švu $F_{\dot{s}v}$, zhotoveného se změnou jednoho parametru při zachování všech ostatních parametrů, dostáváme koeficient jako poměrnou veličinu danou podílem:

$$\alpha = \frac{F_{\dot{s}v}}{F_{\dot{s}z}} \quad (4.70)$$

Postup:

Simulací mechanického namáhání vytypovaných spojů byly získány experimentálně normovanou metodou [17] hodnoty pevnosti sledovaných spojů.

Vyhodnocení:

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a finální hodnoty byly porovnány s finální hodnotou pevnosti základního hřbetového švu. Koeficient švu α charakterizující druh švu a stehu – tzn.: prostorovou konfiguraci materiálu, konfiguraci nití ve švu a počet stehových řádků byl stanoven vztahem (4.70).

Výsledky:

Vzhledem k množství kombinací determinujících faktorů, které nedovoluje stanovit univerzální koeficienty švu platné obecně, a množství možných struktur spojů a různorodých použitelných textilních materiálů, které nedovoluje v plném rozsahu vyhodnotit všechny možnosti, byly vytypovány nejužívanější druhy švů a stehů.

Sérií experimentů byl uvedenou metodou přibližně stanoven koeficient α pro nejpoužívanější jednořádkové hřbetové a přeplátované švy se stehy 101, 301, 304 a 401, pro víceřádkové přeplátované švy se stehy 301. Výsledky průměrných naměřených hodnot pevnosti a odpovídajících koeficientů α viz tabulka 4.2. Kompletní výsledky měření a specifikace materiálů a švů jsou uvedeny v příloze 2.

Byly sledovány nejzásadnější vlivy:

- vliv druhu stehu
- vliv druhu švu
- vliv počtu stehových řádků
- vliv vzdálenosti stehových řádků.

Výsledky potvrdily výše uvedené předpoklady. Nejvýznamnější vliv se projevil při změně stehových řádků (pro přeplátované švy je $\alpha \approx r$, kde r je počet stehových řad). Výsledky také poukazují na vliv sevření vrstev materiálu a vzniku třecích sil u zakládaných přeplátovaných švů, u kterých koeficient nabýval hodnoty $\alpha > r$.

Tabulka 4.2: Výsledky průměrných naměřených hodnot příčné pevnosti spojů a odpovídajících koeficientů švu α (hodnoty v závorce uvádí vzdálenost stehových řádků)

sledovaný vliv	druh švu	druh stehu	F_s [N]	α
druh stehu	jednořádkový hřbetový 1.01.01	301	212,3	1,00
	jednořádkový hřbetový 1.01.01	101	169,6	0,80
	jednořádkový hřbetový 1.01.01	304	219,1	1,03
	jednořádkový hřbetový 1.01.01	401	253,5	1,19
druh švu	jednořádkový hřbetový 1.01.01	301	212,3	1,00
	jednořádkový přeplátovaný 2.01.01	301	219,6	1,03
	jednořádkový zakládáný 2.04.01	301	255,1	1,20
počet stehových řádků	jednořádkový přeplátovaný 2.01.01	301	219,6	1,03
	dvouřádkový přeplátovaný 2.01.03 (4mm)	301	423,4	1,99
	třířádkový přeplátovaný 2.01.07 (4+4mm)	301	633,9	2,99
počet st. řádků v závislosti na druhu švu	dvouřádkový hřbetový 1.01.03 (4mm)	301	256,0	1,21
	dvouřádkový přeplátovaný 2.01.03 (4mm)	301	423,4	1,99
	dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (4mm)	301	466,3	2,20
vzdálenost stehových řádků	dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (4mm)	301	466,3	2,20
	dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (8mm)	301	476,5	2,25
	dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (12mm)	301	487,4	2,30

4.1.3.3 Identifikace a konfrontace modulů rovinné napjatosti

Identifikace modulů bude provedena vždy pro konkrétní konfiguraci švu a daný stav napjatosti. Konfrontovány budou moduly rovinné napjatosti textilie bez švu a moduly pro různé konfigurace švů.

Použité metody:

Pro porovnání využijeme moduly rovinné napjatosti předpjaté plošné textilie a švu zatížené jednoosým namáháním. Zatěžující tahová síla bude vždy působit ve směru osy 11 buď ve směru kolmém ke švu (šev je umístěn rovnoběžně se směrem 22) nebo ve směru švu (šev je umístěn rovnoběžně se směrem 11) - označení os odpovídá indexům v materiálovém deformačním gradientu.

Z experimentálních dat nám bude známa hodnota působící síly $F_1 = 25$ N ($F_2 = 0$ N), a počáteční šířka experimentálního vzorku textilie $b^0 = 50$ mm.

Osa zatěžování nebude pootočena vzhledem ke struktuře textilie – zatěžující síla bude působit ve směru útku (v případě příčného namáhání švu) nebo ve směru osnovy

(v případě podélného namáhání švu). Bude se tedy jednat o anizotropii ortotropní, charakterizovanou maticí modulů (4.14).

K identifikaci modulů rovinné napjatosti využijeme (bude-li možné zanedbat u_{12} a u_{21}) dvě rovnice Hookeova zákona (4.59b) a vztahy (4.65) a (4.67).

Z rovnic 4.59b lze získat dvě varianty řešení (pro další výpočet využijeme jen \bar{c}_{11}).

1. varianta řešení:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{11} &= \frac{\bar{c}_{11}}{\varepsilon_{11}} = \frac{F_1}{b^o u_{11}^*} \\ \bar{E}_{22} &= \bar{E}_{12} = 0 \\ \bar{E}_4 &= 0 \\ \tilde{E}_4 &= \frac{1}{8} \bar{E}_{11}\end{aligned}\tag{4.71}$$

2. varianta řešení:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{11} &= \frac{\bar{c}_{11}}{(1-\mu^2)\varepsilon_{11}} = \frac{F_1}{(1-\mu^2)b^o u_{11}^*} \\ \bar{E}_{22} &= \frac{\mu^2 \bar{c}_{11} \varepsilon_{11}}{(1-\mu^2)\varepsilon_{22}^2} = \frac{\mu^2 F_1 u_{11}^*}{b^o (1-\mu^2) u_{22}^{*2}} \\ \bar{E}_{12} &= \frac{-\mu^2 \bar{c}_{11}}{(1-\mu^2)\varepsilon_{22}} = \frac{-\mu^2 F_1}{b^o (1-\mu^2) u_{22}^*} \\ \bar{E}_4 &= \frac{\mu^2 \bar{c}_{11} \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}^2 + \mu^2 \varepsilon_{11}^2 + 2\mu^2 \varepsilon_{11} \varepsilon_{22}} = \frac{\mu^2 F_1 u_{11}^*}{b^o (u_{22}^{*2} + \mu^2 u_{11}^{*2} + 2\mu^2 u_{11}^* u_{22}^*)} \\ \tilde{E}_4 &= \frac{1}{8} \frac{\bar{c}_{11} [\varepsilon_{22}^4 + 6\mu^2 \varepsilon_{11}^2 \varepsilon_{22}^2 + \mu^4 \varepsilon_{11}^4 - 8\mu^4 \varepsilon_{11}^2 \varepsilon_{22}^2]}{(1-\mu^2) \varepsilon_{11} \varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{22}^2 + \mu^2 \varepsilon_{11}^2 - 2\mu^2 \varepsilon_{11} \varepsilon_{22})} \\ &= \frac{1}{8} \frac{F_1 [u_{22}^{*4} + 6\mu^2 u_{11}^{*2} u_{22}^{*2} + \mu^4 u_{11}^{*4} - 8\mu^4 u_{11}^{*2} u_{22}^{*2}]}{b^o (1-\mu^2) u_{11}^* u_{22}^{*2} (u_{22}^{*2} + \mu^2 u_{11}^{*2} - 2\mu^2 u_{11}^* u_{22}^*)}\end{aligned}\tag{4.72}$$

Využijeme-li vztahy (4.71 a 4.72), je pro učení modulů třeba znát materiálové a prostorové souřadnice x_i , x_i^o , posuvy u_i , resp. jejich materiálové derivace $u_{i,j}$, které získáme řešením soustavy rovnic (4.25-4.28) a hodnotu Poissonova čísla. Hodnoty materiálových a prostorových souřadnic čtyř blízkých bodů – vrcholů pravoúhlého segmentu – získáme z analýzy obrazu (příklad obr. 4.12) zatěžovaného švu před a po zatížení (tab. 4.3).

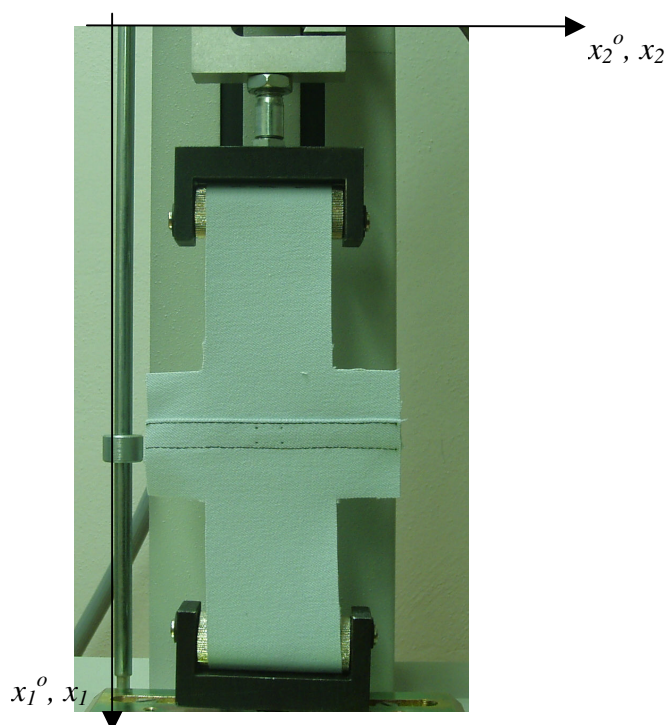
Poissonovo číslo stanovíme porovnáním vztahů pro modul \bar{E}_{11} , který definujeme jako podíl skutečné poměrné síly s_{11} a deformace ε_{11} a srovnáme se vztahem z rovnic (4.72):

$$\begin{aligned}\bar{E}_{11} &= \frac{s_{11}}{\varepsilon_{11}} = \frac{F_1}{b^o(1+u_{22}^*)\varepsilon_{11}} \\ \bar{E}_{11} &= \frac{\bar{c}_{11}}{(1-\mu^2)\varepsilon_{11}} = \frac{F_1}{b^o(1-\mu^2)\varepsilon_{11}}\end{aligned}\quad (4.73)$$

Na základě porovnání vyjde Poissonovo číslo

$$\begin{aligned}\mu^2 &= -u_{22}^* \\ \text{respektive } \mu &= \sqrt{-u_{22}^*}\end{aligned}\quad (4.74)$$

Pro obecné řešení identifikace modulů, kdy nelze zanedbat u_{12} a u_{21} , je třeba vyjít rovnic (4.59a), pro ně je třeba stanovit materiálový deformační gradient F (4.30), tenzor protažení Δ (4.31), jakobián J jako determinant matice F , prostorový deformační gradient F^{-1} , tenzor rotace R , Cauchyho tenzor skutečných poměrných sil Σ (kap. 4.1.2.2), Biotův tenzor poměrných sil S_B a tenzor deformace ε^P (4.20). Dále využít vztahy (4.63-4.65).



Obrázek 4.12: Obraz zatěžovaného švu

Postup:

Moduly rovinné napjatosti byly určovány pro vybrané zástupce švů (specifikace vzorků a jejich grafické vyobrazení viz příloha 5).

Metodou postupného zatěžování experimentálních vzorků s definovaným obrazcem konstantní silou a snímání obrazu (snímkování) byl získán soubor snímků původních a deformovaných obrazců. Snímky byly pořízeny pomocí digitálního fotoaparátu vždy ze stejné vzdálenosti. Pomocí analýzy obrazu byla vytvořena databáze posuvů, zachycující deformaci (posuv) pro danou strukturu a stav zatěžování (tab. 4.3).

Dále byly určeny hodnoty rozdílů materiálových a prostorových souřadnic koncových bodů úhlopříček segmentu (tab. 4.4).

Rozdíl materiálových souřadnic:

$$\begin{aligned}\Delta x_1^{ol} &= x_1^{ol} - x_1^{o3} \\ \Delta x_2^{ol} &= x_2^{ol} - x_2^{o3} \\ \Delta x_1^{oll} &= x_1^{o4} - x_1^{o2} \\ \Delta x_2^{oll} &= x_2^{o4} - x_2^{o2}\end{aligned}\quad (4.75)$$

Rozdíl prostorových souřadnic:

$$\begin{aligned}\Delta x_1^I &= x_1^I - x_1^3 \\ \Delta x_2^I &= x_2^I - x_2^3 \\ \Delta x_1^{II} &= x_1^4 - x_1^2 \\ \Delta x_2^{II} &= x_2^4 - x_2^2\end{aligned}\quad (4.76)$$

Řešením soustavy rovnic (4.25-4.28), respektive rovnic:

$$\begin{aligned}u_{11} &= \frac{1}{U} (\Delta x_1^I \Delta x_2^{oll} - \Delta x_1^{II} \Delta x_2^{ol}) - 1 \\ u_{12} &= \frac{1}{U} (\Delta x_1^{II} \Delta x_1^{ol} - \Delta x_1^I \Delta x_1^{oll}) \\ u_{21} &= \frac{1}{U} (\Delta x_2^I \Delta x_2^{oll} - \Delta x_2^{II} \Delta x_2^{ol}) \\ u_{22} &= \frac{1}{U} (\Delta x_2^{II} \Delta x_1^{ol} - \Delta x_2^I \Delta x_1^{oll}) - 1\end{aligned}\quad (4.77)$$

$$\text{kde: } U = \Delta x_1^{ol} \Delta x_2^{oll} - \Delta x_1^{oll} \Delta x_2^{ol}$$

získáme složky materiálového gradientu posuvu (tab. 4.5).

Výsledky:

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů [mm]

vzorek	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
1: hřbetový šev namáhání: ve směru příčném	1	216,292	245,667	198,458	247,208
	2	216,792	235,792	199,083	237,833
	3	222,875	236,083	207,667	238,000
	4	222,708	245,750	207,083	247,542
2: přeplátovaný šev namáhání: ve směru příčném	1	219,000	247,125	201,208	248,417
	2	219,000	237,375	201,458	238,875
	3	224,958	237,375	208,125	238,875
	4	224,667	247,375	208,000	248,583
3: hřbetový šev namáhání: ve směru podélném	1	219,917	244,250	197,208	243,542
	2	219,917	238,708	197,292	239,458
	3	230,542	238,708	210,250	239,417
	4	230,625	244,375	210,375	243,708
4: přeplátovaný šev namáhání: ve směru podélném	1	217,000	244,000	195,792	244,917
	2	216,917	238,208	195,833	239,583
	3	227,625	238,125	208,500	239,583
	4	227,458	244,000	208,500	245,167
5: textilie namáhání: ve směru útku	1	215,458	247,625	197,583	247,583
	2	215,625	237,417	197,667	238,167
	3	221,375	237,583	204,542	238,333
	4	221,333	247,833	204,458	247,792
6: textilie namáhání: ve směru osnovy	1	216,583	243,625	186,667	244,708
	2	216,750	238,042	186,958	239,375
	3	227,000	238,000	200,083	239,250
	4	227,083	243,750	200,292	244,833

Tabulka obsahuje průměrné hodnoty z provedených měření, kompletní naměřená data viz příloha 5.

Tabulka 4.4: Vypočtené hodnoty rozdílů souřadnic vrcholů segmentů [mm]

vzorek	úhlopříčka	Δx_1^{or}	Δx_2^{or}	Δx_1^r	Δx_2^r
1: hřbetový šev namáhání: ve směru příčném	I	-6,583	9,583	-9,208	9,208
	II	-5,917	-9,958	-8,000	-9,708
2: přeplátovaný šev namáhání: ve směru příčném	I	-5,958	9,750	-6,917	9,542
	II	-5,667	-10,000	-6,542	-9,708
3: hřbetový šev namáhání: ve směru podélném	I	-10,625	5,542	-13,042	4,125
	II	-10,708	-5,667	-13,083	-4,250
4: přeplátovaný šev namáhání: ve směru podélném	I	-10,625	5,875	-12,708	5,333
	II	-10,542	-5,792	-12,667	-5,583
5: textilie namáhání: ve směru útku	I	-5,917	10,042	-6,958	9,250
	II	-5,708	-10,417	-6,792	-9,625
6: textilie namáhání: ve směru osnovy	I	-10,417	5,625	-13,417	5,458
	II	-10,333	-5,708	-13,333	-5,458

Tabulka 4.5: Vypočtené hodnoty složek materiálového gradientu posuvu

vzorek	u_{11}	u_{12}	u_{21}	u_{22}
1: hřbetový šev namáhání: ve směru příčném	0,37711	-0,01485	0,01095	-0,03161
2: přeplátovaný šev namáhání: ve směru příčném	0,15775	-0,00189	-0,00662	-0,02541
3: hřbetový šev namáhání: ve směru podélném	0,22464	-0,00539	0,00148	-0,25280
4: přeplátovaný šev namáhání: ve směru podélném	0,19884	0,00499	0,01550	-0,06418
5: textilie namáhání: ve směru útku	0,18267	0,00390	0,00250	-0,07737
6: textilie namáhání: ve směru osnovy	0,28915	0,00213	-0,00387	-0,03679

Hodnoty u_{12} a u_{21} materiálového gradientu posuvu jsou malé, proto je eliminujeme vztahy (4.32) a k identifikaci modulů použijeme vztahy (4.71 a 4.72). Výsledky jsou uvedeny v tabulkách (4.6 a 4.7 - 4.8).

Tabulka 4.6: Vypočtené hodnoty složek materiálového gradientu posuvu pro jednoosou napjatost

vzorek	u_{11}^*	u_{22}^*
1: hřbetový šev namáhání: ve směru příčném	0,37671	-0,03121
2: přeplátovaný šev namáhání: ve směru příčném	0,15782	-0,02548
3: hřbetový šev namáhání: ve směru podélném	0,22462	-0,25278
4: přeplátovaný šev namáhání: ve směru podélném	0,19913	-0,06447
5: textilie namáhání: ve směru útku	0,18271	-0,07741
6: textilie namáhání: ve směru osnovy	0,28912	-0,03677

Tabulka 4.7: Vypočtené hodnoty modulů dle varianty 1

vzorek	\bar{E}_{11} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_{22} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_{12} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_4 [Nm ⁻¹]	\tilde{E}_4 [Nm ⁻¹]
1: hřbetový šev ve směru příčném	1327,267	0	0	0	165,908
2: přeplátovaný šev ve směru příčném	3168,266	0	0	0	396,033
3: hřbetový šev ve směru podélném	2225,940	0	0	0	278,242
4: přeplátovaný šev ve směru podélném	2510,893	0	0	0	313,862
5: textilie ve směru útku	2736,616	0	0	0	342,077
6: textilie ve směru osnovy	1729,369	0	0	0	216,171

Tabulka 4.8: Vypočtené hodnoty modulů dle varianty 2

vzorek	\bar{E}_{11} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_{22} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_{12} [Nm ⁻¹]	\bar{E}_4 [Nm ⁻¹]	\tilde{E}_4 [Nm ⁻¹]
1: hřbetový šev ve směru příčném	1370,027	6229,346	516,108	1258,993	1299,833
2: přeplátovaný šev ve směru příčném	3251,113	3177,503	513,074	1863,440	1350,526
3: hřbetový šev ve směru podélném	2978,971	594,611	669,149	592,125	414,142
4: přeplátovaný šev ve směru podélném	2683,923	1650,836	534,456	1269,218	791,773
5: textilie ve směru útku	2966,216	1279,221	541,950	1107,289	723,633
6: textilie ve směru osnovy	1795,381	4081,807	519,086	1458,757	1115,259

První varianta bude dávat správné výsledky pouze v případě malých rozměrů experimentálních vzorků, proto je třeba využívat 2. varianty.

Moduly rovinné napjatosti byly určovány pro vybrané zástupce švů zatěžované jednoosým namáháním ve směru příčném a ve směru podélném vůči směru švu. Byly sledovány změny modulů rovinné napjatosti textile a švu v závislosti na směru namáhání vzhledem ke struktuře švu. Výsledky dokumentují změnu odporu proti namáhání:

- u hřbetových švů se při namáhání ve směru příčném odpor proti namáhání (modul E_{11}) výrazně snižuje oproti textilii bez švu (srovnáváno s textilií ve směru útku)
- u přeplátovaných švů se při namáhání ve směru příčném odpor proti namáhání (modul E_{11}) zvyšuje nad hodnotu tohoto modulu textile bez švu (což potvrzuje i fakt, že při namáhání vzorků nad mez pevnosti docházelo u všech sledovaných vzorků k přetrhu materiálu, nikoli švu)
- při namáhání ve směru podélném se moduly E_{11} vzorků se švy hřbetovými a přeplátovanými výrazně neliší, přesahují však hodnoty těchto modulů zjištěné u textile bez švu (srovnáváno s textilií ve směru osnovy)
- moduly E_{22} textile ve směru osnovy byly výrazně vyšší oproti modulům E_{22} textile ve směru útku (použitá textile měla ve směru útku elastomerové nitě, které patrně tento rozdíl ovlivnily)
- při namáhání švů ve směru příčném došlo k výraznému zvýšení modulů E_{22} oproti textilii namáhané ve směru útku, což bylo způsobeno zpevněním textile švem
- při namáhání švů ve směru podélném došlo k významnému snížení modulů E_{22} (u hřbetových švů bylo výraznější) oproti textilii namáhané ve směru osnovy, což bylo způsobeno přerušáním útkových nití textile
- smykové moduly textile se švem se při příčném namáhání nepatrně zvýšily oproti textilii bez švu, při podélném namáhání se snížily

4.2 STANOVENÍ PEVNOSTI SPOJE PŘI DYNAMICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ

V některých aplikacích technických konfekcí (padáky, airbagy, ...) se setkáváme s takovou činností, při které vznikají rázové síly působící na textilií a její spoje. Pro tyto aplikace je třeba řešit otázky stanovení dynamických vlastností, aby mohly být voleny správné konstrukční parametry. Na základě studia rázové pevnosti švu je možno formulovat doporučení pro projektování spojů v praxi.

Spolehlivé vyšetření pevnosti švu při dynamickém zatěžování je možné pouze **experimentálními metodami** (resp. rozsáhlým experimentálním výzkumem každého typu spoje – značně časově a finančně náročným). **Teoretické stanovení pevnosti** při dynamickém rázu není možné vzhledem k složitému mechanismu působení rázu. Pro textilní materiály je prakticky nemožné vzhledem k jejich anizotropním vlastnostem a různorodosti.

Proto je současně hledána cesta teoretických i experimentálních metod posouzení, které vyřeší alespoň dílčí problémy:

- a) otázky vzniku a šíření napět'ových vln v textiliích
 - vznik vln napětí je důsledek šíření pulsu nárazových sil tělesem konečnou rychlostí
 - průběh šíření vln závisí na viskoelastických vlastnostech a směru šíření
- b) problémy analytického vyšetřování rázu textilií
 - vliv konečných rozměrů – vznik odražených vln
 - vliv švu – vznik dalších složek vln
- c) problémy experimentálního zkoumání silového působení na textilie během rázu
 - absence laboratorního přístroje
 - vliv rázového působení síly na textilií se švem
 - časový průběh síly a deformace
 - závislost síly na deformaci

4.2.1 Teoretické vyšetřování rázu

Význam teoretického zkoumání rázu spočívá v teoretickém objasnění působení rázových sil na tělesa (textilii, textilií se spojením). Cílem je analyzovat problematiku od obecných zákonitostí dynamického působení.

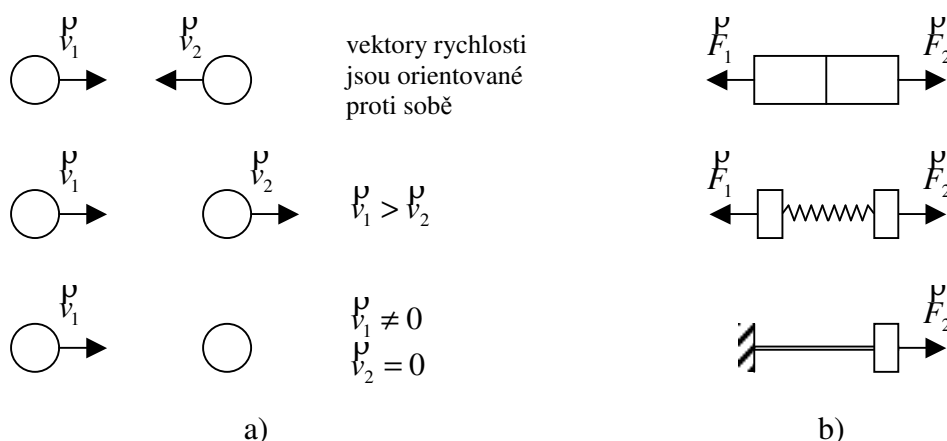
V kapitole je a pojednáno o existujících teoriích rázu z nichž vychází studium a metodách vyšetřování rázu, které jsou úvodem k řešení dalších problémů. Další podkapitoly jsou věnovány průzkumu možností teoretického zkoumání rázu, ale také poukazují na náročnost této problematiky.

4.2.1.1 Dynamický ráz

Dynamický ráz je jev, při kterém dochází k okamžité změně pohybu (změně velikosti a směru vektoru rychlosti) hmotných bodů soustavy v relativně krátkém čase působením značně velkých vnějších sil vzniklých v místě dotyku těles.

Ráz je děj, který obecně vzniká při srážce či rozpadu těles, v situaci, kdy na sebe tato tělesa působí prudkými nárazovými silami a kdy při dotyku těchto těles brání jedno těleso druhému v pohybu – tělesa si překážejí nebo je pohyb nějakým způsobem omezen (těleso je upevněno, spojeno s jiným tělesem, ...).

Pokud se tělesa pohybují relativním pohybem proti sobě (obr.4.13a), působí na sebe tlakovými silami, nastává srážka, případně odraz těles. Pokud na sebe dvě vzájemně spojená tělesa (dvě části jednoho tělesa) působí tahovou silou (příp. je přírůstek kinetické energie na úkor vnitřní energie např. pružiny, radioaktivního jádra apod.), pohybují se relativním pohybem od sebe (obr.4.13b), nastává rozpad. U textilních materiálů a spojů budeme uvažovat vždy tahové namáhání.



Obrázek 4.13: Schematické znázornění vzájemného působení těles při rázu

Ráz probíhá v relativně krátkém časovém intervalu (dle [26, 27] 10^{-4} - 10^{-6} s), způsobuje deformační a pohybové účinky.

Je zapříčiněný působením nárazových sil dosahujících značných hodnot (dle [26] 10^3 x větší než běžné síly – tíhové apod.). Při rázu roste nárazová síla prudce od nuly ke svému maximu a opět klesá na nulu.

Účinek nárazové síly se měří impulsem rázu I :

$$I = \int_0^{\tau} F_{\tau} \cdot dt \quad (4.78)$$

kde: F_{τ} ... okamžitá nárazová síla [N]
 τ ... doba rázu [s]

Nárazové síly musí vyvodit velké impulsy - během krátké doby trvání rázu se poloha tělesa téměř nezmění, nastává ale téměř okamžitě poměrně velká změna rychlosti (velikosti a směru), hybnosti a energie tělesa. Za normálních podmínek (quasistatické působení sil) se mění rychlost plynule, při rázovém působení nastávají změny náhle.

4.2.1.2 Teorie rázu

Ráz je speciální případ přenosu silových účinků pevnými látkami. Je to velmi komplikovaný jev. Mimořádná složitost rázových jevů je příčinou řady nevyřešených problémů v této oblasti. Teoretická řešení rázu přináší matematické obtíže, experimentální ověření jsou těžko proveditelná.

V průběhu vývoje vznikly tři teorie zabývající se přenosem sil a rázy (uvedeno je chronologické řazení dle historického vývoje):

1. Stereostatická (tzv. elementární) Newtonova teorie rázu
2. Vlnová teorie rázu – teorie šíření napětí
3. Quasistatická Hertzova teorie rázu

Jedná se o teoretické metody, které umožňují více méně přibližné řešení různých problémů s rázy v praxi.

Newtonova teorie je nejstarší (1686), shrnuje dosud známé znalosti o rázu hmotných bodů, pružných a plastických těles.*

Vychází ze zákonů mechaniky tuhého tělesa, což teorii omezuje. Skutečný stav nahrazuje modelem – rázem bodových hmot. Pracuje s hybností a kinetikou energií. Nedefinuje deformační energii – pro vyjádření rázu nedokonale pružných těles zavádí koeficient restituce.

Koeficient restituce (též součinitel odrazivosti, vzpruživost) vyjadřuje ve své podstatě nedokonalost Newtonovy teorie. Určuje se pro každý případ dotýkajících těles experimentálně, je definován z hybností před rázem a po rázu. Je to však veličina značně nejistá, ovlivňována řadou faktorů (není to pouhá materiálová konstanta)**. Závisí na geometrickém tvaru těles, tvaru a drsnosti kontaktních ploch, absolutní velikosti těles, materiálu kolidujících těles, způsobu nárazu těles (geometrické konfiguraci), relativní rychlosti těles před rázem.

Stereostatická teorie je nedokonalá, ale používaná (a běžně uváděná v literatuře z fyziky [např. 26, 27]) pro svoji jednoduchost. Klade si jednoduché cíle: z daných rychlostí před rázem určit kinematický stav těles po rázu. Nedává však odpověď na zásadní otázky jako je velikost síly mezi kolidujícími tělesy, časový průběh sil během rázu, ztráty energie při rázu či doba trvání rázu. Koeficient restituce má fyzikální smysl jen u tvarově jednoduchých těles (bodové hmoty, koule, tyče) a za jednoduchých konfigurací při kolizi těles. Pro případy rázového namáhání textilií není tato teorie vhodná.

Hertzova teorie je nejmladší (1881). Vznikla patrně z důvodů náročného řešení rázu vlnovou teorií.

Quasistatická teorie předpokládá, že veškerá energie narážejícího tělesa se přemění v deformační energii, kterou vyjadřuje energií pružiny stlačenou jistou quasistaticky působící silou, a že deformace jsou omezeny na místo styku těles. Skutečný stav vyjadřuje modelem, který zohledňuje pružnost těles – modelem, ve kterém je pružnost tělesa nahrazena pružinou. Jedná se o přibližnou teorii, která odstraňuje nedostatky Newtonovy teorie, dovede určit velikost a časový průběh sil během rázu a dobu jeho trvání.

* Teorii později doplnil John Wallis definováním středu perkuse.

** Tabulky koeficientů restituce musí uvádět údaje o způsobu získávání hodnot koeficientu.

Teorie staví na předpokladu, že „se rázu účastní jen tenká kontaktní pružná hmota, která se deformuje, zbytek tělesa se chová jako tuhé těleso, projevující se jen svou setrvačností“, že deformace jsou lokálně omezené na nejbližší okolí místa styku těles a rychle mizí s rostoucí vzdáleností od tohoto místa [28]. Aplikuje vztahy pro kontaktní síly/napětí při statickém zatížení těles – závislost mezi deformací a silou je nelineární.

Uvedená teorie je pokročilejší, dává dobré výsledky pro kulovitá tělesa (je citlivá na dokonalý tvar těles v místě styku) a „malé“ rychlosti rázu (10^{-1} m/s), kdy doba trvání rázu je řádově větší než potřebuje vlna k průletu tělesem a zpátky (zlomky m/s). Nedává odpověď na otázky rozložení napětí uvnitř tělesa. Pro případy rázového namáhání textilií tato teorie také není použitelná, neboť deformace se musí v důsledku pružnosti textilií přenést do jejich nitra.

Vlnová teorie představuje nejvyšší stadium vývoje. Je nejbližší skutečným fyzikálním jevům vznikajícím při rázu. Umožňuje některá řešení složitých otázek rázu.

Vychází z faktu, že každým materiálem se šíří účinek síly konečnou rychlostí (značně velkou [km/s]) jako postupná vlna. Skutečné těleso se modeluje jako spojitě kontinuum* – prostředí bez struktury, se stejnými mechanickými vlastnostmi, které lze vyjádřit analyticky spojitými funkcemi. Pracuje s pojmy rychlost přenosu sil, rychlost šíření napětí.

Teorie respektuje pružnost těles. Zabývá se jevy, které při rázu vznikají přímo v tělesech. Aplikace výpočetní techniky pak umožní řešení složitých matematických závislostí.

Teorie je využívána pro teoretické objasnění rázových jevů v poddajných tělesech, přičemž přesná řešení dynamiky vlnových jevů jsou odvoditelná jen pro tvarově jednoduchá tělesa a složitější útvary je nutno řešit přibližnými numerickými metodami. Teorie je využívána v signální počítačové technice, akustické emisí a diagnostice, aplikační sféru je možno rozšířit pro popis hlubších zákonitostí chování textilií.

4.2.1.3 Metody vyšetřování rázu

Nejčastějším způsobem vyšetřování rázu je popis kinematického stavu kolidujících těles před a po rázu. Zjišťování rychlostí je účelné v aplikacích, kde dochází k odrazu a nedochází k destrukci. Pro textilie znamená vyšetřování rázu popis dynamických dějů z hlediska působení sil, vzniku a šíření napětí a posuzování energetické bilance.

a) Vyšetřování rázu částic

Částice jsou tělesa bez vnitřní struktury libovolné povahy. Pro teorii rázu částic je možno využít stereostatickou teorii.

* pozn.: Model kontinua má hranice platnosti – model kontinua přestává platit, když se délka vlny napětí přiblíží rozměrům krystalů látky (tomu odpovídá jistá vlnová frekvence – pro ocel asi 100 MHz). [28]

Pro ráz částic jsou vzájemné síly akce a reakce, jimiž na sebe částice během rázu působí, vnitřními silami. Vzhledem k tomu, že ostatní vnější síly (např. tíhové apod.) jsou obvykle v poměru k silám nárazovým velmi malé a doba trvání rázu je krátká, můžeme impulsy ostatních sil zanedbat a soustavu považovat za izolovanou soustavu, pro kterou platí **zákony zachování** hybnosti a momentu hybnosti a zákon zachování energie (zákon zachování mechanické energie nemusí platit):

$$\sum_{(k)} p_k = \sum_{(k)} p_k^o \quad (4.79)$$

$$\sum_{(k)} L_k = \sum_{(k)} L_k^o \quad (4.80)$$

$$\sum_{(k)} E_k = \sum_{(k)} E_k^o \quad (4.81)$$

kde: $p, L, E \dots$ konečná hybnost, konečný moment hybnosti, konečná energie
 $p^o, L^o, E^o \dots$ počáteční hybnost, počáteční moment hybnosti, počáteční energie

K řešení rázu částic se užívají **impulsové věty**:

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (4.82)$$

$$M = \frac{dL}{dt} \quad (4.83)$$

kde: $F \dots$ nárazová síla [N]
 $M \dots$ moment síly [N m]

Impuls nárazových sil je pak roven změně hybnosti každého tělesa:

$$I_\tau = \int_0^\tau \overset{p}{F}_\tau \cdot dt = \int dp = p - p^o \quad (4.84)$$

$$\overset{p}{K}_\tau = \int_0^\tau \overset{p}{M}_\tau \cdot dt = \int dL = L - L^o$$

kde: $p^o, p \dots$ počáteční hybnost, konečná hybnost [kg m s^{-1}]
 $L^o, L \dots$ počáteční moment hybnosti, konečný moment hybnosti [$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$]

Takové vyšetřování rázu nevyžaduje znalost konkrétního časového průběhu nárazové síly $F(\tau)$ mezi tělesy, ale rozhodující je výsledný impuls nárazových sil $I(\tau)$ a impuls momentu nárazových sil $K(\tau)$. Ze zákonů zachování hybnosti určujeme rychlosti těles, ze zákonů zachování energie určujeme deformační práci.

b) Vyšetřování rázu těles

Zákony zachování můžeme použít i na ráz těles, ale situace je zde složitější. Zákony zachování nepopisují ráz jednoznačně (např. v případě šikmé srážky neposkytují dostatek rovnic).

Pokud neznáme přesný mechanismus silové interakce těles, nemůžeme ráz plně popsat. Ráz těles závisí na geometrickém tvaru těles, jejich rozměru, pružnosti, drsnosti povrchů, struktuře, konstrukčním uspořádání, relativní rychlosti před rázem, způsobem rázu (geometrickou konfigurací). Ráz je možno plně popsat u pevných pružných těles, pokud známe jejich tvar a drsnost.

Při vyšetřování rázu těles se v praxi využívá vlnová teorie nebo se vyšetřuje pomocí koeficientu restituace (např. v oblasti dynamiky mechanických soustav strojních částí).

c) Vyšetřování rázu textilií

Pro teoretické vyšetřování dynamických jevů u textilií (viskoelastických, anizotropních útvarů) je možno použít jako základní aparát vlnovou teorii, která respektuje jejich charakter. Pouze dynamická teorie pružnosti pracující s elastickými vlnami šířícími se pružným kontinuem konečnou rychlostí umožní výklad a částečně objasní děje.

Reálná skutečnost je natolik složitá, že ji nelze přesně popsat – proto vlnová teorie pracuje s přibližným fyzikálním modelem prostředí – kontinuem (nebo diskretním modelem). Nelze matematicky dokázat, že je model korektní, možným kritériem je experiment (pokud se teoretické výsledky nerozházejí s experimentálními, je akceptován). Vznikají však obtíže při experimentálním sledování rázových jevů, neboť časy, které potřebuje vlna k průletu tělesem běžných rozměrů jsou extrémně krátké. Experiment by mohl být usnadněn aplikací počítačové techniky se speciálními softwary s vysokorychlostním snímáním dat, s možností záznamu a analýzy dat.

Aplikaci analytických metod vlnové teorie rázu na analýzu rázové pevnosti textilií a spojů znesnadňují další vzniklé složky vln, zapříčiněné specifickými vlastnostmi textilií:

- viskoelastické vlastnosti – vznik tlumení
- omezené rozměry, speciální tvary, drsnost povrchu – vznik odražených vln
- spoje textilií (navíc nové kontinuum nemusí být téhož typu) – vznik přestupujících vln

Vzhledem k velké složitosti dějů vyžaduje teoretická analýza zjednodušení, proto jsou uváděny vztahy, které popíší vlnové jevy nejprve pro zjednodušená prostředí a umožní částečnou analýzu rázového působení. Toto pomyslné zjednodušené prostředí je:

- spojitě
- izotropní
- lineární (tzv. Hookeovo kontinuum)
- jeho elastické vlastnosti popisují dvě elastické charakteristiky
 - E (G) ... modul pružnosti v tahu (smyku)
 - μ ... Poissonovo číslo
- ztráty energie při pohybu vln napětí jsou nulové
- děje jsou isotermické

4.2.1.4 Analýza působení rázových sil a šíření napětí v elastickém prostředí

Náhle působící síla má na pružné těleso jiné účinky než quasistaticky působící síla. Náhle působící síla vyvolá na jednom konci tělesa napětí, které potřebuje jistý čas k tomu, aby se přeneslo na druhý konec tělesa. Rázu se neúčastní hned celá hmota tělesa. Účinek síly se v materiálu projeví jako rozruch, který rozkmitá nejbližší okolí, rozkmitané okolí předá kmitání dalšímu okolí – vzniká vlnění, které v materiálu postupuje a přenáší konečnou rychlostí vyvolaná napětí. Prostřednictvím napěťových vln se šíří tělesem také deformace a energie. Tělesem nelze přenést sílu bez jeho deformace.

V podstatě ale každé začínající zatížení a každá změna zatížení potřebuje jistý čas k tomu, aby se přeneslo na druhý konec. Vznikají přechodové stavy napjatosti. Vlna projde tělesem a pokud zatížení trvá delší čas, dojde po utlumení vlnových procesů ke statickému neměnnému zatížení.

Napětí se v prostředí šíří jako vlna určitou rychlostí – charakteristickou pro daný materiál. Pohyb vlny je výsledkem vzájemného silového působení částic prostředí na sebe navzájem. Je podmíněn pružnými vlastnostmi hmoty. Na těchto vlastnostech a hustotě závisí rychlost šíření vln – fázová rychlost.

Prostředím postupují odlišné typy vln, při kterých body kontinua kmitají v omezeném okolí své rovnovážné polohy.

V neomezeném prostředí existují dva základní typy vln:

- příčné (smykové, torsní, ekvivolumetrické) vlny
 - směr posuvu bodů kontinua je kolmý na směr postupu vlny
 - způsobuje změnu tvaru (vychýlení a rotaci elementů)
 - např. kmitání struny, zúžení tělesa, vlnění na vodní hladině
- podélné (dilatační, nerotační) vlny
 - směr posuvu bodů kontinua se shoduje se směrem postupu vlny
 - způsobují změnu tvaru a objemu (i hustoty)
 - např. zvukové vlny, prodloužení tělesa

V trojrozměrném prostředí se mohou šířit vlny jako:

- kulová (sférická) vlna
 - zdrojem rozruchu je bod
 - vlnoplochy jsou koncentrické kulové plochy
- rotačně symetrická vlna
 - zdrojem rozruchu jsou body uspořádané podél přímky
 - vlnoplochy jsou souosé válcové plochy
- rovinná vlna
 - zdrojem rozruchu jsou body v ploše (nebo je bod ve velké vzdálenosti)
 - vlnoplochy jsou roviny kolmé na směr postupu vlny

U rovinných případů (jakými mohou být za jistých okolností i textilie) je základem kruhová vlna vyvolaná bodovým rozruchem a vlnoplochy se mění na křivky (přímky, kružnice) – tzv. vlnové čelo, což je geometrické místo, které odděluje část kontinua, jímž vlnění prošlo, a které postupuje kontinuem určitou fázovou rychlostí a šíří určitým způsobem rozložené napětí (silový puls). Všechny body trojrozměrného

kontinua ležící v této ploše mají v daném čase stejné kinematické veličiny (kmitají se stejnou fází).

Vlnění, kterým se šíří napětí, může být:

- obecné vlnění
- periodické vlnění
- izolovaný silový puls
- vlnění pro náhle proměnlivá napětí (označují se jako rázová napětí) – mají strmé čelo vlny (tj. stav na okraji vlny vykazující charakteristický skok – nespojitost)

Prostředí, ve kterém se vlnění šíří, ovlivní průběh vlnění. Reálné prostředí je ohraničené (tělesa mají konečné rozměry) a není dokonale pružné (vedle síly způsobující kmitavý pohyb působí síla odporu prostředí a dochází k tlumení vlnění). Vzniká složitá situace šíření vln, kterou je třeba řešit postupnými kroky, proto bude způsob řešení problémů elastodynamiky nejprve popsán v elastickém prostředí – v jednorozměrném neohraničeném kontinuu (nejjednodušším možném útvaru) – a bude sledována jedna harmonická vlna. Dále popsaná teorie vychází z [29].

a) Šíření vlnění v jednorozměrném kontinuu

Jednorozměrné kontinuum je útvar, jehož příčné rozměry jsou o 3 řády menší než je vlnová délka napěťové vlny.

Pohyb hmotných bodů (elementů) kontinua lze analyticky popsat parciální diferenciální rovnicí:

- pro příčné vlnění má vlnová rovnice tvar:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.85)$$

kde: $w \dots$ výchylka hmotného bodu kolmo na směr postupu vlny [m]
 $x \dots$ polohová souřadnice [m]
 $t \dots$ čas [s]
 $c \dots$ fázová rychlost příčných vln v jednorozměrném kontinuu [m s^{-1}]

- pro podélné vlnění má vlnová rovnice tvar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_o^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.86)$$

kde: $u \dots$ výchylka hmotného bodu ve směru postupu vlny [m]
 $x \dots$ polohová souřadnice [m]
 $t \dots$ čas [s]
 $c_o \dots$ fázová rychlost podélných vln v jednorozměrném kontinuu [m s^{-1}]

Fázová rychlost je rychlost jakou postupuje čelo rozruchu a jakou se šíří vlny napětí v materiálu.* V pevných látkách je dána vztahem:

- pro příčné vlnění

$$c = \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (4.87)$$

kde: $F \dots$ působící síla [N]
 $m \dots$ jednotková hmotnost [kg]

- pro podélné vlnění

$$c_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.88)$$

kde: $E \dots$ Youngův modul pružnosti v tahu [N m^{-2}]
 $\rho \dots$ hustota prostředí [kg m^{-3}]

Fázová rychlost c je stálá a nezávislá na jejich délce (frekvenci):

$$c = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T} = \frac{\Omega}{2\pi} \lambda = \frac{\Omega}{\gamma} \quad (4.89)$$

kde: $\lambda \dots$ vlnová délka [m]
 $f \dots$ frekvence [s^{-1}]
 $T \dots$ perioda [s]
 $\Omega \dots$ úhlová frekvence (úhlová rychlost) [rad s^{-1}]
 $\gamma \dots$ vlnové číslo [rad m^{-1}]

Vztah neplatí pro podélné sinusové vlny, jejichž vlnová délka je malým násobkem příčného rozměru. Pro takové jednorozměrné kontinuum závisí fázová rychlost na vlnové délce (s klesající vlnovou délkou klesá neomezeně k nule) a vzniká disperze vln.

Řešení vlnové rovnice uvádí např. literatura [28, 16].

- Eulerův tvar:

$$w = \Phi(x - ct) + \Psi(x + ct) \quad (4.90)$$

kde: $\Phi, \Psi \dots$ jsou funkce, které je nutno určit z počátečních podmínek kinematického stavu

Funkce Φ vyjadřuje neproměnné rozložení výchylek elementů kontinua (tvar vlny), které se pohybují rychlostí c v kladném směru souřadnice x , funkce Ψ vyjadřuje neproměnné rozložení výchylek, které se pohybují rychlostí c proti kladnému směru souřadnice x .

- D'Alembertovo řešení:

$$w = \frac{1}{2} [f(x - ct) + f(x + ct)] + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} g(\xi) d\xi \quad (4.91)$$

kde: $f(x) \dots$ funkce, která vyjadřuje rozložení výchylek elementů kontinua na začátku pohybu
 $g(x) \dots$ funkce, která vyjadřuje rozložení rychlostí elementů kontinua v tomtéž okamžiku
 $\xi \dots$ integrační proměnná

* Neurčuje rychlost jakou se pohybuje hmotný bod!

- Bernoulliovo řešení*:

$$w(x,t) = \left[C \cos\left(\frac{\Omega}{c}x\right) + D \sin\left(\frac{\Omega}{c}x\right) \right] \cdot (A \cos \Omega t + B \sin \Omega t) \quad (4.92)$$

kde hodnotu úhlové frekvence Ω a konstanty A,B,C,D určíme z okrajových podmínek

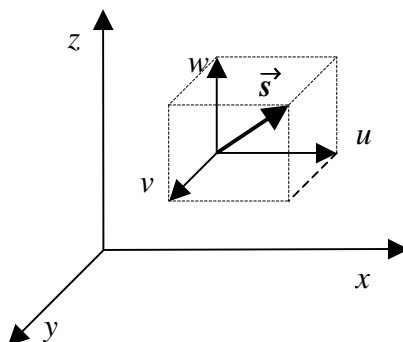
Fyzikální význam vlnové pohybové rovnice pro jednorozměrné kontinuum spočívá v tom, že popisuje děje:

- pohyb hmotných bodů kontinua a rozložení deformací – tj. výchylky ve směru vlnění (zhuštění a zředění materiálu) a kolmo na směr šíření vlnění (příčné pohyby bodů), neuvažuje radiální pohyby
- přenos napětí
- přenos energie (před a za vlnou je energie stálá, daná potenciální energií)

b) Šíření vlnění v trojrozměrném kontinuu

Trojrozměrné kontinuum je jako model prostředí frekvenčně omezeno: délka vln musí být alespoň o řád větší než rozměr největších zrn.

Dále popsaná teorie vychází z malých přetvoření izotropního tělesa uvedenou např. ve [28]. Pohyb hmotných bodů (elementárních hranolů) kontinua je analyticky popsán pohybovou rovnicí pro vektor posuvu \vec{s} se složkami u , v , w (obr. 4.14).



Obrázek 4.14: Schematické znázornění vektoru posuvu

- rovnice má pro vektor posuvu tvar:

$$\frac{\partial^2 \vec{s}}{\partial t^2} = c_1^2 \nabla (\nabla \cdot \vec{s}) - c_2^2 \nabla x (\nabla \times \vec{s}) \quad (4.93)$$

- kde:
- \vec{s} ... vektor posuvu
 - c_1 ... fázová rychlost podélných vln v trojrozměrném kontinuu [m s^{-1}]
 - c_2 ... fázová rychlost příčných vln v trojrozměrném kontinuu [m s^{-1}]
 - ∇ ... Hamiltonův operátor
 - x ... polohová souřadnice [m]

* v literatuře často připisováno Fourierovi

- složkové pohybové rovnice mají tvar:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (4.94)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (4.95)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad (4.96)$$

kde: ρ ... hustota prostředí [kg m^3]

σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} ... normálová napětí [N m^{-2}]

τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} ... smyková napětí [N m^{-2}]

pro něž platí (Hookeův zákon pro izotropní látku):

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda \Delta + 2G \varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda \Delta + 2G \varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda \Delta + 2G \varepsilon_{zz} \end{aligned} \quad (4.97)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G \varepsilon_{xy} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = G \varepsilon_{xz} \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = G \varepsilon_{zy} \end{aligned} \quad (4.98)$$

kde: ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} , ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{xz} ... jsou složky poměrného přetvoření (pro lineární teorii), pro něž platí:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \quad (4.99)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (4.100)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \Delta &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.101)$$

kde: Δ ... kubická dilatace

- dosazením dostanou pohybové rovnice základní tvar:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + G \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w\end{aligned}\quad (4.102)$$

kde: ∇^2 ... Laplaceův operátor
 λ ... Laméova konstanta [N m⁻²]
 G ... modul pružnosti ve smyku [N m⁻²]

- zavedením vektoru rotace dostanou pohybové rovnice výhodnější tvar:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial x} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial y} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (4.103)$$

kde: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$... složky vektoru rotace (nejsou to složky tenzoru)
 pro něž platí:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \omega_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (4.104)$$

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0 \quad (4.105)$$

- rovnice 4.102 lze dále zjednodušit vyjádřením posuvů

$$u = A_1 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x \pm ct)} \quad (4.106)$$

$$v = A_2 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x \pm ct)} \quad (4.107)$$

$$w = A_3 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x \pm ct)} \quad (4.108)$$

kde A_1, A_2, A_3 ... jsou složky amplitudy vektoru s

- pohybové rovnice dostanou tvar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.109)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (4.110)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.111)$$

kde: c_1 ... fázová rychlost podélných vln v trojrozměrném kontinuu [m s^{-1}]
 c_2 ... fázová rychlost příčných vln v trojrozměrném kontinuu [m s^{-1}]

Fázová rychlost šíření vln napětí v trojrozměrném kontinuu (v pevných látkách) je dána vztahem:

- rychlost dilatačních vln (rovinných):

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (4.112)$$

- rychlost torzních vln (rovinných):

$$c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.113)$$

kde: G ... modul pružnosti ve smyku [N m^{-2}]
 ρ ... hustota prostředí [kg m^{-3}]
 λ ... Leméova konstanta [N m^{-2}]

- poměry rychlostí (závisí jen na Poissonově čísle) jsou dány vztahy:

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{c_2} &= \sqrt{\frac{2-2\mu}{1-2\mu}} \\ \frac{c_1}{c_0} &= \sqrt{\frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2}} \\ \frac{c_2}{c_0} &= \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}} \end{aligned} \quad (4.114)$$

kde: μ ... Poissonovo číslo, pro něž platí omezení $\langle 0; 0,5 \rangle$

Z teorie pružnosti plyne:

$c_1 > c_0$... protože v neohraničeném kontinuu je potlačena kontrakce a prostředí je tužší
 $c_2 < c_0$... modul pružnosti ve smyku je značně menší než modul pružnosti v tahu

Fázová rychlost je stálá a nezávislá na jejich délce (nevznikne tedy disperze vln) a **nezávislá na směru šíření** (důsledek izotropie prostředí).

(Zajímavé je, že fázové rychlosti jsou pro různé materiály jen málo rozdílné)

– např.: pro ocel $c_0 = 5\,190 \text{ m/s}$, $c_1 = 5\,950 \text{ m/s}$, $c_2 = 3\,180 \text{ m/s}$,
pro sklo $c_0 = 5\,300 \text{ m/s}$, $c_1 = 5\,800 \text{ m/s}$, $c_2 = 3\,350 \text{ m/s}$

c) Šíření vlnění ve dvojrozměrném kontinuu

Dvojrozměrné kontinuum je útvar, jehož jeden rozměr (tloušťka) je řádově menší než další dva. Je-li tloušťka o řád větší než délka vlny vznikne přibližně stav rovinného přetvoření. Je-li tloušťka o řád menší než délka vlny vznikne přibližně stav rovinné napjatosti.

Pro dvojrozměrné kontinuum bude posuv ve směru jedné z os (osa y) anulován:

- složkové pohybové rovnice se redukuje na dvě rovnice pro rovinné přetvoření:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial x} - 2c_2^2 \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \quad (4.115)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - 2c_2^2 \frac{\partial \omega_y}{\partial x} \quad (4.116)$$

kde: Δ ... kubická dilatace

ω_y ... složka vektoru rotace

pro něž platí:

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.117)$$

$$\omega_x = 0 \quad (4.118)$$

$$\omega_z = 0$$

- pohybové rovnice pro rovinné přetvoření dostanou tvar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.119)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.120)$$

- pohybové rovnice pro rovinnou napjatost:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_3^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.121)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.122)$$

kde: c_3 ... fázová rychlost podélných vln v dvojrozměrném kontinuu [m s^{-1}]

- rychlost podélných vln v dvojrozměrném kontinuu je dána vztahem:

$$c_3 = \sqrt{\frac{E}{(1-\mu)^2 \rho}} \quad (4.123)$$

- poměr rychlostí (závisí jen na Poissonově čísle) je dán vztahem:

$$\begin{aligned}\frac{c_3}{c_1} &= \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}} \\ \frac{c_3}{c_0} &= \frac{1}{(1-\mu)} \\ \frac{c_3}{c_2} &= \sqrt{\frac{2}{1-\mu}}\end{aligned}\tag{4.124}$$

Z teorie pružnosti plyne, že c_3 je jen o málo větší než c_0 .

d) Odraz a přestup vln

Pohyb vln popsaný výše uvedenými vztahy platí pro neomezená prostředí (tělesa nekonečných rozměrů) ve kterých se mohou šířit jen dva typy vln – podélné a příčné. U reálných těles konečných rozměrů dochází ke složitější situaci. Rázové děje uvnitř kontinua ovlivní jeho ohrazení – koncové body a hraniční plochy (roviny) a uložení těchto konců.

U jednorozměrného kontinua je situace relativně jednoduchá. Je ohrazeno **koncovými body** a mohou nastat tři případy uložení těchto konců, které jsou definovány jako:

- **volný konec**
 - kontinuum nenavazuje na pevné těleso
 - napětí je na volném konci trvale nulové

$$E\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x=0} = 0\tag{4.125}$$

- **pevný konec (nehybný)**
 - kontinuum je pevně spojeno s „dokonale tuhým“ tělesem*
 - výchylka je na pevném konci trvale nulová

$$\begin{aligned}(w)_{x=0} &= 0 \\ (u)_{x=0} &= 0\end{aligned}\tag{4.126}$$

- **rozhraní prostředí**
 - kontinuum (prostředí I) navazuje na tvarově stejné kontinuum (prostředí II) z jiného materiálu (obecně mají různé fázové rychlosti)
- $$c_0^I \neq c_0^{II}\tag{4.127}$$

* idealizace pevného konce jako tuhého tělesa slouží k demonstraci odrazu bez přestupu vln, ve skutečnosti vždy dochází k určitému přestupu

- na rozhraní jsou stejné výchylky (posuvy) a stejná napětí

$$(u')_{x=0} = (u'')_{x=0}$$

$$E' \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)_{x=0} = E'' \left(\frac{\partial u''}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (4.128)$$

U volných a pevných konců dochází k odrazu dopadající vlny se stejnou frekvencí, v rozhraní se část vln odrazí a část prostoupí. Průběh šíření napětí závisí na typu vlny:

- **odraz na volném konci**
 - volný konec odrazí *podélnou vlnu* s opačnou fází – změni smysl napětí (měni tahovou vlnu na tlakovou a naopak)
- **odraz na pevném konci**
 - pevný konec odrazí *příčnou vlnu* s opačnou fází – změni se smysl výchylek
 - pevný konec odrazí *podélnou vlnu* se stejnou fází – nezmění smysl napětí (napětí se sčítají)
- **děje na rozhraní prostředí**
 - na rozhraní se část energie *podélných vln* odrazí a část prostoupí
 - vlna prochází rozhraním spojitě, v obou prostředích kmitají vlny se stejnou frekvencí, ale ne vlnovou délkou a fázovou rychlostí (u různých materiálů nemusí být stejná), amplitudy jsou obecně různé (průchod vlny do druhého prostředí způsobí pokles amplitudy odražené vlny)
 - průběh odrazu a prostupu vln (resp. množství průchozí energie) závisí na poměru charakteristických impedancí obou prostředí**

$$\text{charakteristická impedance} = \rho \cdot c \quad (4.129)$$

- je-li charakteristická impedance druhého prostředí větší, rozhraní se chová jako pevný konec, odražená vlna nemění znaménko napětí
- je-li charakteristická impedance druhého prostředí menší, rozhraní se chová jako volný konec, odražená vlna měni znaménko napětí
- je-li charakteristická impedance pro obě prostředí stejně velká, nedojde vůbec k odrazu, dopadající vlna projde beze změny

** za pevný konec lze dle [28] považovat spojení z materiálů s rozdílem charakteristické impedance o dva řády

U trojrozměrného kontinua mohou nastat velmi složité případy, jestliže se jedná o reálná tělesa – tzn., že kontinuum je nějakým způsobem ohraničeno – tzv. **hraničním povrchem**. Odlišují se zjednodušené případy:

- **poloprostor**
 - kontinuum ohraničené jednou hraniční rovinou
- **tlustá rozlehlá deska**
 - kontinuum ohraničené dvěma rovnoběžnými hraničními rovinami v jisté vzdálenosti $d \neq 0$ (konečná tloušťka)

Speciální případ je dvourozměrné kontinuum

- **tenký pás**
 - dvourozměrné kontinuum ohraničené dvěma rovnoběžnými hraničními přímkami (malá tloušťka $t = 0$, konečná šířka $d \neq 0$)

Jsou definovány dva případy hraničních povrchů:

- **volný povrch**
 - za hraničním povrchem je vakuum (za volný povrch lze dle [28] pokládat i případ, kdy je za hraničním povrchem plyn o tlaku menším než 100 N/cm^2)
 - napětí jsou na volném povrchu trvale nulové

$$\sigma_{xx} = 0, \quad \tau_{xz} = 0, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (4.130)$$

- **rozhraní prostředí**
 - kontinuum I navazuje (dělicí plochy jsou rovinné, pevně spojené) na kontinuum II z jiného materiálu (stejněho typu – neuvažujeme zde kapaliny a plyny, které mají pouze modul objemové stlačitelnosti, a ve kterých se mimochodem nemohou šířit příčné vlny)

$$\begin{aligned} c_1^I &\neq c_1^{II} \\ c_2^I &\neq c_2^{II} \end{aligned} \quad (4.131)$$

- na rozhraní jsou stejné výchylky (složky posuvů) a stejná napětí

$$\begin{aligned} u^I &= u^{II} & v^I &= v^{II} & w^I &= w^{II} \\ \sigma_{xx}^I &= \sigma_{xx}^{II} & \sigma_{xx}^I &= \sigma_{xx}^{II} & \sigma_{xx}^I &= \sigma_{xx}^{II} \end{aligned} \quad (4.132)$$

U volných povrchů dochází k odrazu dopadající vlny (se stejnou frekvencí), v rozhraní se část vln odrazí a část prostoupí. Průběh dějů závisí na:

- typu vlny – obecná vlna má dvě složky (pro zjednodušení se vyšetřují vlny odděleně – byl zaveden souřadný systém, kde rovina yz byla ztotožněna s hraniční rovinou a rovina xz byla proložena normálou k hraniční rovině (obr.4.15*))
 - podélnou:
 - D-vlna – postupuje rychlostí c_I v rovině xz , vyvolává posuvy u' (se složkami u, w) ve směru postupu vlny, posuv v je trvale nulový

* pozn.: schematické znázornění je pro přehlednost zjednodušeno, obecně nebude úhel dopadu β_I příčné vlny roven úhlu odrazu β_2 příčné vlny, která vznikla rozpadem podélné vlny

- příčnou, která závisí na rovině polarizace:
 - SV-vlna – polarizovaná v rovině xz , postupuje rychlostí c_2 , přenáší výchylky w' (se složkami u, w) kolmo na směr postupu vlny
 - SH-vlna – polarizovaná v rovině xy , přenáší výchylky (v) kolmé na xz , ve směru y (pro desky a pásy mají význam ohybových vln)
- úhlu dopadu
 - úhel dopadu vlny je úhel odklonu vektoru postupu vlny od osy x
 - pro úhly dopadu ($\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$), odrazu ($\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$) a lomu ($\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$) platí Snellův zákon, který má

pro rozpad D-vlny tvar:

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1^I} = \frac{\sin \alpha_2}{c_1^I} = \frac{\sin \alpha_3}{c_1^{II}} = \frac{\sin \beta_2}{c_2^I} = \frac{\sin \beta_3}{c_2^{II}}$$

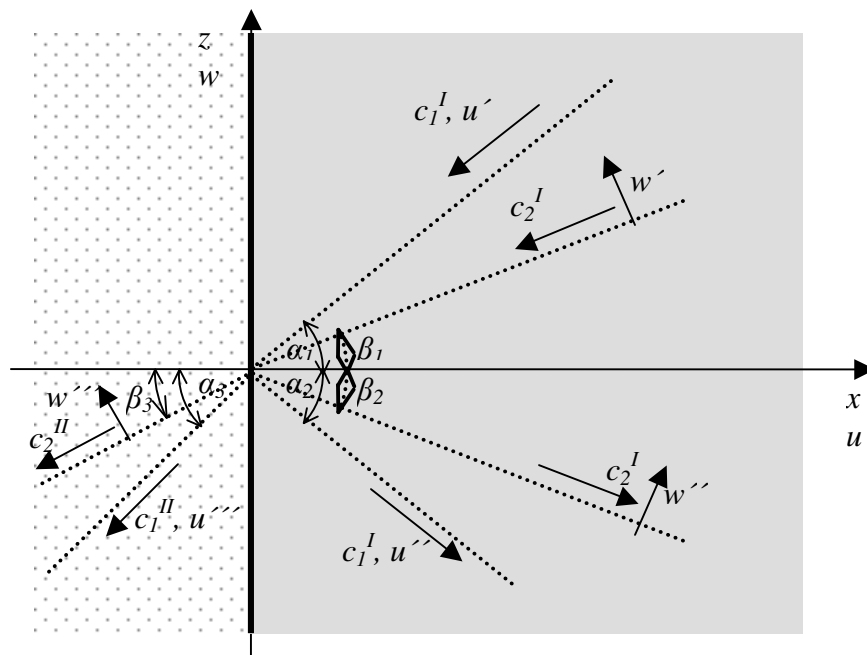
pro rozpad SV-vlny tvar:

$$\frac{\sin \beta_1}{c_2^I} = \frac{\sin \beta_2}{c_2^I} = \frac{\sin \beta_3}{c_2^{II}} = \frac{\sin \alpha_2}{c_1^I} = \frac{\sin \alpha_3}{c_1^{II}} \quad (4.133)$$

pro rozpad SH-vlny tvar:

$$\frac{\sin \gamma_1}{c_2^I} = \frac{\sin \gamma_2}{c_2^I} = \frac{\sin \gamma_3}{c_2^{II}}$$

kde: $\alpha_{1,2,3} \dots$ jsou úhly dopadu, odrazu a lomu D-vlny
 $\beta_{1,2,3} \dots$ jsou úhly dopadu, odrazu a lomu SV-vlny
 $\gamma_{1,2,3} \dots$ jsou úhly dopadu, odrazu a lomu SH-vlny



Obrázek 4.15: Schematické znázornění odrazu a lomu vln

Průběh šíření napětí v trojrozměrném kontinuu:

- **volný rovinný povrch poloprostoru**
 - odrazí *D-vlnu* dopadající na povrch pod úhlem α_1 , která se rozpadne na odraženou *D-vlnu* pod úhlem $\alpha_2 = \alpha_1$ a odraženou *SV-vlnu* pod úhlem β_2
 - zvláštní případ nastane, když je úhel dopadu *D-vlny* nulový: volný rovinný povrch odrazí *D-vlnu* dopadající kolmo na povrch na *D-vlnu* stejné amplitudy ale opačné fáze*
 - odrazí *SV-vlnu* dopadající na povrch pod úhlem β_1 , která se rozpadne na odraženou *D-vlnu* pod úhlem α_2 a odraženou *SV-vlnu* pod úhlem $\beta_2 = \beta_1$
 - zvláštní případ nastane, když je úhel odrazu *D-vlny* 90° : nastane tzv. totální odraz – volný rovinný povrch odrazí pouze *SV-vlnu* stejné amplitudy a stejné fáze (*D-vlna* se pohybuje podél povrchu volného poloprostoru a neodnáší žádnou energii)
 - odrazí *SH-vlnu* dopadající na povrch pod úhlem γ_1 , na *SH-vlnu* pod úhlem $\gamma_2 = \gamma_1$, stejné amplitudy a opačné fáze
- **rovinné rozhraní prostředí**
 - každá dopadající vlna vyvolá podélné i příčné vlny v obou prostředích (odražené a prostoupené) – se rozpadne na čtyři vlny
 - dopadající *D-vlna* se rozpadne na odraženou *D-vlnu* pod úhlem $\alpha_2 = \alpha_1$ a odraženou *SV-vlnu* pod úhlem β_2 a na prostoupenou *D-vlnu* pod úhlem α_3 a prostoupenou *SV-vlnu* pod úhlem β_3
 - zvláštní případ nastane, když *D-vlna* dopadá na rozhraní kolmo (úhly dopadu, odrazu a lomu jsou nulové), vlna se rozpadne jen na *D-vlnu* odraženou a *D-vlnu* prostoupenou, průběh odrazu a prostupu vln závisí na poměru charakteristických impedancí obou prostředí (viz rozhraní jednorozměrného kontinua)
 - dopadající *SV-vlna* se rozpadne na odraženou *D-vlnu* pod úhlem α_2 a odraženou *SV-vlnu* pod úhlem $\beta_2 = \beta_1$ a na prostoupenou *D-vlnu* pod úhlem α_3 a prostoupenou *SV-vlnu* pod úhlem β_3
 - zvláštní případ nastane, když *SV-vlna* dopadá na rozhraní kolmo (úhly dopadu, odrazu a lomu jsou nulové), vlna se rozpadne jen na *SV-vlnu* odraženou a *SV-vlnu* prostoupenou
 - dopadající *SH-vlna* se rozpadne na odraženou *SH-vlnu* pod úhlem $\gamma_2 = \gamma_1$ a na prostoupenou *SH-vlnu* pod úhlem γ_3

* Další zvláštní případy nastávají pro nízké hodnoty Poissonova čísla ($\mu \leq 0,263$) – existují takové hodnoty úhlu dopadu, pro něž odpadne *D-vlna* a vniká jen *SV-vlna* (více) [28])

U povrchu pružného poloprostoru (hraniční roviny) navíc existují zvláštní typy vln – Rayleighovy a Loveovy vlny.

Rayleighovy vlny postupují podél povrchu rychlostí c_R (je jen o málo menší než rychlost příčného vlnění), vyvolávají rovinné přetvoření, jejich amplitudy leží v rovině dané směrem postupu vlny a kolmé k povrchu, klesají exponenciálně se vzdáleností pod povrchem. Posuvy kolmo na rovinu amplitud jsou nulové. Také napětí na povrchu poloprostoru je trvale nulové.

Loveovy vlny se též pohybují podél hraniční roviny, amplitudy mají rovnoběžné s povrchem. Mohou se šířit v elastické vrstvě ležící na elastickém poloprostoru s rozdílnými elastickými konstantami.

Na zakřivených plochách povrchů (volných, hraničních) pružného poloprostoru bude situace značně složitější. Zde se výrazně projeví vliv tvaru plochy.

Celou situaci může výrazně zkomplikovat nerovnost povrchu (která je víceméně vždy přítomná). Odchytky od hladké roviny se projeví v závislosti na vlnové délce (nejkratší ze spektra dopadajících vln):

- bude-li vlnová délka řádově větší než rozměry nerovností, bude teorie platná
- bude-li vlnová délka srovnatelná s rozměry nerovností, vyvolají elementární plošky velice komplikovaný stav

Tímto nejsou problémy beze zbytku vyřešeny. Prozatím byly sledovány výchylky jedné harmonické vlny jediné vlnové délky (frekvence). Pro výsledný stav vlnění se uplatní princip superpozice.

Výše uvedený přehled dává tušit rozmanitost všech možných kombinací nových složek vln vznikajících u těles nějakým způsobem ohraničených. Tímto konečným rozměrem jsou pak ovlivněny pohybové rovnice – při jejich řešení musíme splnit okrajové podmínky.

4.2.1.5 Vliv viskoelasticity na šíření napětí

Šíření napětí představuje šíření oscilace hmotným prostředím. Oscilace (kmitání) je pohyb, při kterém se hmotný element působením vnější síly pohybuje v omezeném okolí ze své rovnovážné polohy. Pokud vedle síly způsobující kmitavý pohyb působí na hmotný element prostředí odporovou silou, dochází k tlumení kmitavého pohybu a vzniká tlumené vlnění. Tlumení vlnění (disipace energie) způsobuje viskózní účinek prostředí.

Ve viskoelastickém prostředí se projevuje viskózní odpor, který má směr proti smyslu pohybu a brzdí deformace, způsobí tak „zpoždění“ deformace, nebo-li:

- deformace je funkcí napětí a času
- deformace se nemůže realizovat okamžitě a je vratná jen částečně
- viskózní odpor roste s rychlostí deformace

Odlišujeme dva základní typy tlumení:

- vnější tlumení (absolutní)
 - způsobuje okolní viskózní prostředí, v němž sledované kontinuum kmitá
(v této práci nebude sledováno)
- vnitřní tlumení (relativní)
 - způsobují vnitřní viskoelastické vlastnosti prostředí

Viskoelastické vlastnosti prostředí se řadí mezi mechanické vlastnosti závislé na čase (tedy i na rychlosti zatěžování). Složitě chování těchto prostředí popisují reologické rovnice. Tyto materiálové vztahy (vztahy mezi napětím a přetvořením) vychází z reologických modelů [32], které znázorňují mechanické působení schematicky. Definovat přetvárné vlastnosti skutečných látek je umožněno skládáním účinků jednotlivých vlastností jednoduchých ideálních modelů tzv. základních reologických prvků (abstraktních látek).

Pro analytické řešení časově závislých deformačních dějů se vychází z lineární diferenciální rovnice:

$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot \frac{d\sigma}{dt} + a_2 \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + b_2 \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \dots \quad (4.134)$$

kde: $a_i, b_i \dots$ materiálové konstanty, charakteristické pro danou látku

$\sigma \dots$ napětí [Nm^{-2}]

$\varepsilon \dots$ deformace

$t \dots$ čas [s]

Obvykle se omezujeme na první řády derivací, pak viskoelastické vlastnosti lze vyjádřit lineární diferenciální rovnicí prvního řádu s konstantními koeficienty:

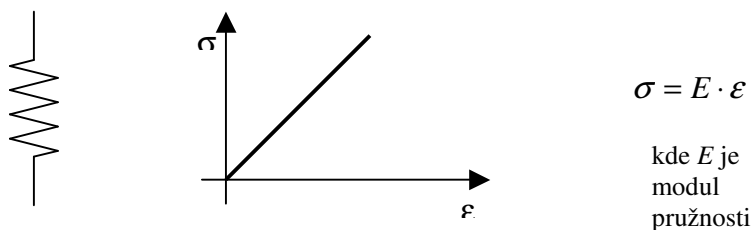
$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot \frac{d\sigma}{dt} = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.135)$$

Reologické modely lze vytvářet ze základních reologických prvků spojováním:

- **sériově**
 - napětí na jednotlivých elementech jsou stejná
 - deformace se sčítají
 - rychlosti deformací se sčítají
- **paralelně**
 - napětí se sčítají
 - deformace na jednotlivých elementech jsou stejné
 - rychlosti deformace na jednotlivých elementech jsou stejné

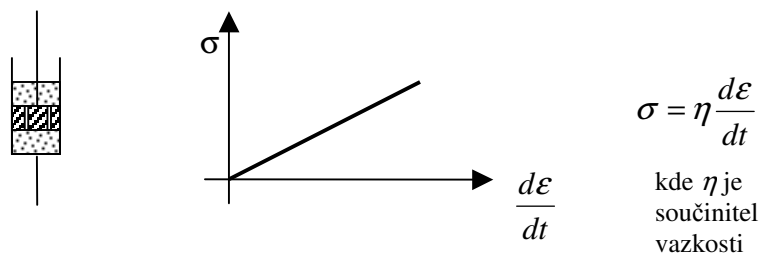
Reologické základní prvky pro viskoelastické látky jsou:

- **pružná hmota (Hookeova)**
 - modelovaná dokonale pružným pérem
 - pro napětí platí lineární Hookeův zákon



Obrázek 4.16: Schematické znázornění pružné hmoty

- **vazká kapalina (Newtonova)**
 - modelovaná tlumičem (pístem s otvory ve válci s kapalinou)
 - pro napětí platí zákon vazkého pohybu



Obrázek 4.17: Schematické znázornění vazké kapaliny

Viskoelastické vlastnosti modelují modely:

- **Kelvin-Voigtův**
 - paralelní spojení pružného a vazkého prvku
 - vhodný na aplikace pro modelování průběhu krípu

$$K = H / N$$

- **Maxwellův**
 - sériové spojení pružného a vazkého prvku
 - vhodný na aplikace pro modelování relaxace napětí

$$M = H \cdot N$$

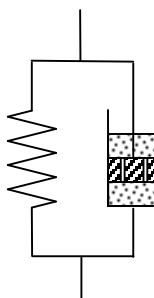
- **Poyntingův-Thompsonův**
 - seriové spojení Kelvinova modelu a pružného prvku

$$PTh = H_1 - (H_2 / N)$$

- **Zenerův**
 - paralelní spojení Maxwelllova modelu a pružného prvku

$$Z = H_1 / (H_2 - N)$$

Předpokládejme, že sledovaný materiál je charakterizován elasticitou s paralelní viskozitou popsanou modelem Kelvin-Voigta (obr. 4.18).



Obrázek 4.18: Schematické znázornění Kelvin-Voigtova modelu

- deformace a rychlosti deformace na jednotlivých elementech jsou stejné

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_H = \varepsilon_N \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{d\varepsilon_H}{dt} = \frac{d\varepsilon_N}{dt} \end{aligned} \quad (4.136)$$

- výsledné napětí je součtem napětí v obou větvích

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_N \quad (4.137)$$

- základní reologická rovnice je

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.138)$$

kde: η ... součinitel vazkosti

- viskoelasticita se vyjádří vztahem

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (4.139)$$

kde: u ... definuje posuv

4.2.1.6 Vliv anizotropie na šíření napětí

Anizotropní látky mají vlastnosti závislé na směru. Mechanické chování takových materiálů pak závisí navíc na směru šíření napětí.

Napětí se v prostředí šíří určitou fázovou rychlostí, která je charakteristická pro daný materiál a závisí na pružných vlastnostech hmoty a hustotě. Šíření napětíových vln realizované výše uvedenými typy vln platí pro izotropní prostředí, ve kterých se mohou šířit podélné a příčné vlny jen danou fázovou rychlostí.

U těles s anizotropními vlastnostmi bude docházet ke komplikovanému stavu napjatosti, neboť průběh šíření napětí, energie a deformace uvnitř kontinua ovlivní jeho anizotropie. Vlny budou v závislosti na směru jejich postupu kmitat různou fázovou rychlostí a vznikne jen těžko popsateľný stav napjatosti.

U plošných textilií odlišujeme čtyři základní druhy anizotropie, které byly popsány v kap. 4.1.2 pomocí modulů rovinné napjatosti.

4.2.1.7 Analytické vyšetřování rázu textilií

Výše rozpracované analytické závislosti můžeme využít pro vyšetřování rázových jevů délkových a plošných textilií. Výchozí problém elastodynamiky textilií, který je důležitý z praktického hlediska, je podélný ráz.*

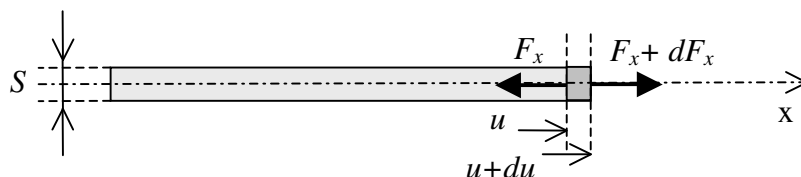
Analýza umožní sestavit konkrétní pohybové rovnice a sledovat, jaké procesy probíhají uvnitř textilií při rázu.

a) Podélný ráz nití

Analytické vyšetřování podélného rázu niti vede ve svém důsledku k určení pohybové rovnice pro podélné vlnění v niti definované jako viskoelastické jednorozměrné kontinuum.

O niti předpokládejme, že při podélných posuvech elementů nitě dochází k zanedbatelným příčným deformacím a řezy zůstávají vzhledem k ose rovinné, resp. že se jedná o jednoosou napjatost (normálové napětí je rovnoměrně rozložené po průřezu).

Případ podélného rázu nastane, pokud na vypnutou nit začne náhle působit tahová síla F_x ve směru osy nitě (obr. 4.19). Pružnost nitě umožní posuvy elementů nitě ve směru osy x .



Obrázek 4.19: Schematické znázornění podélného rázu niti

* Vzhledem k zaměření práce (na tahové namáhání textilie v rovině) se bude řešení rázového namáhání věnovat pouze případům podélného rázu (což nevylučuje výskyt případů příčného rázu textilií).

Pro jednoosou napjatost platí:

$$F_x = S \cdot \sigma_x \quad (4.140)$$

kde: $S \dots$ plocha průřezu nitě [m^2]
 $\sigma_x \dots$ normálové napětí, pro které vzhledem k viskoelasticitě platí:

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x + \eta \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} \quad (4.141)$$

kde: $E \dots$ modul pružnosti [Nm^{-2}]
 $\eta \dots$ součinitel vazkosti, resp. koeficient útlumu
 $\varepsilon_x \dots$ poměrné prodloužení, pro které platí:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.142)$$

kde: $u \dots$ posuv elementu nitě

Pohybová rovnice elementu nitě hmotnosti m má tvar:

$$m \cdot a = (F_x + dF_x) - F_x \quad (4.143)$$

$$\text{resp.: } \rho \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial F_x}{\partial x} dx$$

Po úpravě získáme pohybovou rovnici s vnitřním tlumením pro podélné vlnění v jednorozměrném kontinuu:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (4.144)$$

kde: $c_0 \dots$ fázová rychlost podélných vln v jednorozměrném kontinuu [m s^{-1}]

Její řešení budeme hledat ve tvaru:

$$u(x, t) = \phi(x - c_0 t) + \psi(x + c_0 t) \quad (4.145)$$

Pro její řešení musíme splnit okrajové podmínky. Pokud je jeden konec nitě upnutý a druhý volný budou okrajové podmínky

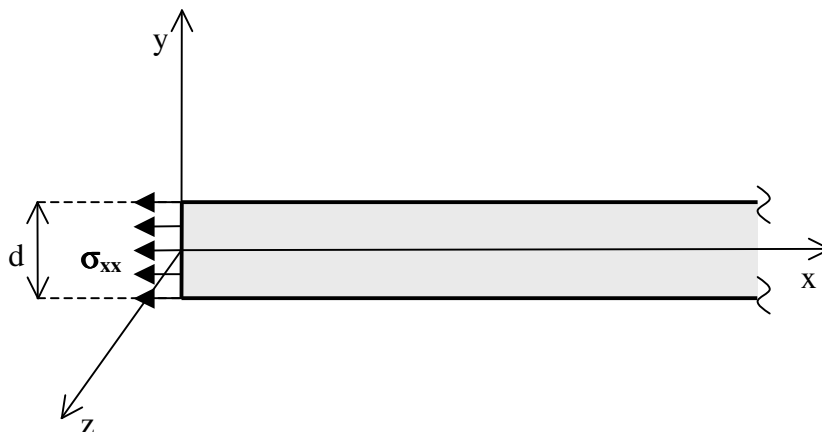
- pro pevný konec: $x = 0, u = 0$,
- pro volný konec: $x = l, \sigma = 0$ resp. $\varepsilon = 0$

b) Podélný ráz plošných textilií

Analytické vyšetřování rázu částečně objasní, jak vypadá šíření rozruchu vyvolaného náhlým zatížením okraje textilie s ohledem na její konečné rozměry.

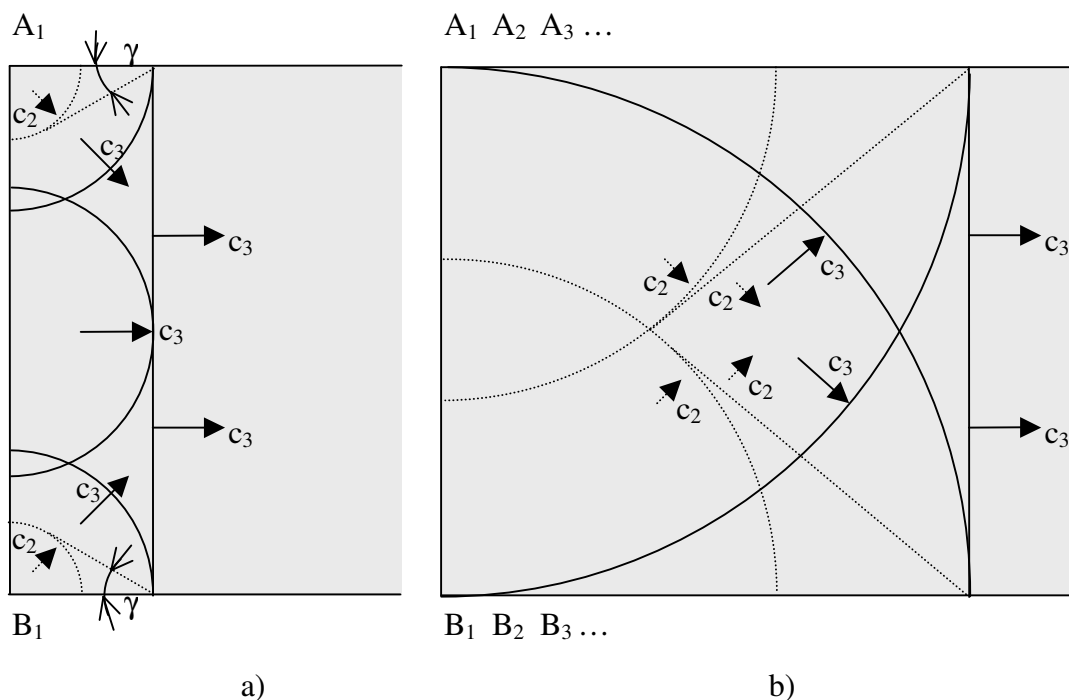
Pro vyšetřování bude využit pruh textilního materiálu, který bude idealizován jako dvourozměrné kontinuum (nebude uvažována tloušťka a anizotropie), pak jej lze na počátku rázu (než nastane odraz podélné vlny odlehčení od protilehlé hraniční přímky) považovat za viskoelastickou polorovinu a situaci bude možno vyšetřovat jako rovinnou napjatost. Ke kvalitativnímu rozboru počátku rázu bude využito Huygens-Fresnelova principu – každý bod vlnového čela se stává novým zdrojem elementární kruhové podélné i příčné vlny pohybující se danou rychlostí a výsledný stav je dán superposicí těchto vln.

Příklad podélného rázu je možno simulovat situací, kdy na pás textilního materiálu (obr. 4.20) šířky d začne ve všech bodech okrajové přímky pásu působit náhle vzniklé tahové napětí σ_{xx} . Okraj pásu se začne pohybovat v rovině xy ve směru osy x rychlostí v , v tomto směru se pás začne protahovat a v kolmém směru (osa y) se začne zužovat (přetvoření ve směru osy z zanedbáme).



Obrázek 4.20: Schematické znázornění podélného rázu textilního pásu

Na obr. 4.21 je znázorněno rozložení vlnových čel na počátku rázu a po uplynutí určitého času, kdy čela podélné vlny odlehčení postoupí k protilehlým hraničním přímkám. V tomto stavu se dilatační vlna odlehčení rozpadne na odraženou dilatační a odraženou příčnou vlnu a situace se zkomplikuje.



Obrázek 4.21: Idealizovaný případ šíření rozruchu v textilním pásu

V okamžiku rázu se všechny body hraniční přímky se stanou zdrojem elementárních podélných vln postupujících rychlostí c_3 , obálkou kruhových čel těchto dilatačních vln je rovné čelo postupující rychlostí c_3 ve směru osy x – vznikne prvotní tahová vlna napětí (obr. 4.21a), která vyvolává jen posuvy u ve směru osy x . Pohyb hmotných bodů je popsán pohybovou rovnicí pro podélné vlnění pro rovinnou napjatost, která má s přihlédnutím k visloelestaticitě tvar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_3^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (4.146)$$

Příčné posuvy začínají v rozích pásu na okrajové přímce u hraniční přímky (uvnitř kontinua nemohou příčné posuvy vzniknout, neboť výslednice sil působících na tyto body má pouze x -ovou složku). Krajiní body A_1 , B_1 se stanou zdrojem nejen dilatační vlny postupující rychlostí c_3 i příčné vlny posupující rychlostí c_2 . Pohyb hmotných bodů je popsán pohybovou rovnicí pro příčné vlnění pro rovinnou napjatost, která má s přihlédnutím k visloelestaticitě tvar:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \quad (4.147)$$

Protože $c_3 > c_2$, vyvolá podélná vlna v dalších okrajových bodech (A_2 , A_3 , ..., B_2 , B_3 , ...), jak jsou postupně zasahovány čelem podélné vlny, vždy novou dvojici vln – podélné a příčné vlny. Obálkou kruhových čel těchto podélných vln je stále tatáž přímka (rovné čelo podélných vln postupující rychlostí c_3 ve směru osy x), obálkou

kruhových čel těchto příčných vln je ke kruhovému čelu primární příčné vlny (která postupuje z bodu A_1) připojená přímka svírající s okrajem Machův úhel γ , pro který platí:

$$\sin \gamma = \frac{c_2}{c_3} \quad (4.148)$$

Protilehlé krajní body se začnou pohybovat i příčně ve směru osy y , část deformační energie (E_p napjatosti) se změní v kinetickou (příčný pohyb elementů), na hraniční přímce začne klesat napětí a od rohů ke středu přímky postupuje vlna odlehčení. Posupně vznikají další elementární vlny odlehčení v jednotlivých protilehlých bodech hraniční přímky – každý je zdrojem obou typů vln.

Část kontinua, která leží před čelem podélných vln je v daném čase bez napětí, část kontinua mezi vlnovými čely podélné a příčné vlny je zasažen jen dilatační vlnou a prostor za čely příčných vln je vystaven obecnému komplikovanému stavu napjatosti.

Řešení je velmi složité i pro takto zjednodušený případ a není dovedeno do konce – není možno zjistit rozložení napětí po uplynutí dalšího času (po odrazu podélné vlny odlehčení od protilehlé hraniční přímky). Při řešení by pak bylo nutno splnit okrajové podmínky – zde by konečné rozměry způsobily další problémy.

Skutečná situace je podstatně složitější, než výše popsany idealizovaný případ. U podélného rázu plošných textilií se platí další vlivy:

- tloušťka – nastane i zúžení v třetím rozměru
- anizotropie – rychlost vln bude závislá na směru jejich šíření
- nerovnosti hraniční přímky a nerovnost povrchu – odrazy na elementárních ploškách znepřehlední celou situaci, bude-li vlnová délka srovnatelná s rozměry nerovností.

Výsledkem bude velice komplikovaný stav vyvolaný náhodným charakterem změn směru odrazových ploch a fázových rychlostí.

c) Podélný ráz u textilií se švem

Jak vyplývá z výše uvedeného, je nutno se spokojit s nedokončeným řešením již u podélného rázu pásu plošné textilie. Ani zjednodušené řešení zde nedává odpověď na procesy uvnitř textilie po delší době působení rázu. Vzniká zde složitá situace šíření vln a tento neobyčejně složitý komplex problémů je v případě spojených textilií rozšířen o problematiku přestupu a odrazu vln na rozhraní prostředí.

4.2.2 Experimentální stanovení dynamických charakteristik

Cílem experimentálního měření je simulovat dynamické působení síly na textilní materiál a určit vlastnosti textilie či spoje z následků rázu, příp. odhadnout důsledky rázového působení. Podrobně je zde vysvětlena experimentální metoda, která umožňuje jednoduchým způsobem modelovat složité rázové děje a analyzovat jejich účinky. Pozornost je věnována vyhodnocování základních dynamických charakteristik – meze pevnosti v rázu, impulzu rázu a deformační práce pro rázové namáhání. Z výsledků experimentální analýzy je možno formulovat pokyny pro konstrukci a technologii spoje.

K zjišťování, jak se chová materiál při náhlém vzrůstu napětí, slouží rázové zkoušky, které umožňují zhodnotit další vlastnosti materiálu při tomto specifickém namáhání. Vlastnosti však nelze jednoduše zobecnit, platí pro konkrétní použitý materiál a šev. Při těchto zkouškách působí na zkoušený předmět vnější síla rychle, nejčastěji nárazem cizího tělesa o určité rychlosti dopadu. Rázové zkoušky se provádějí metodou přímou nebo nepřímou.

Podstata **přímé metody** spočívá ve zkoušení hotových výrobků pomocí simulace praktické aplikace daného výrobku – tzn., že je nejprve třeba vyrobit z příslušného materiálu za stanovených technologických podmínek požadovaný výrobek, který je při zkoušce namáhán způsobem, jakým bude namáhán při praktickém využití (např. zkouška pevnosti konstrukce padáku se provádí dle normy [19] shozem figuríny z letícího letadla za přesně určených podmínek hmotnosti zátěže a rychlosti letadla). Výstupem takovýchto zkoušek není hodnota žádné mechanické charakteristiky, nýbrž kvalitativní závěr o vyhovujících parametrech výrobku (vyhověl-nevyhověl). Nevýhodou takových zkoušek je velká finanční a časová náročnost, proto je žádoucí projektovat spoje výrobku natolik přesně, aby nebylo nutno zkoušky finálních výrobků neúspěšně opakovat. Z toho důvodu by bylo vhodné najít náhradní metodu, kterou by se dala ověřit rázová pevnost spoje (popřípadě části výrobku) tak, aby vlastní provedení přímých rázových zkoušek mělo již charakter ověřovacích zkoušek. Jednou z možností je simulace dynamického zatížení šitých spojů metodou nepřímou.

Při dynamických zkouškách v rázu **nepřímou metodou** se obvykle používá normalizovaných vzorků a kyvadlové nebo padací kladivo*, které je sestrojeno tak, aby byl materiál při průchodu „nulovou polohou“ namáhán náhle, rázovou silou. Při takových zkouškách se obvykle zjišťuje velikost práce spotřebované k porušení, popřípadě k deformaci zkoušeného vzorku. Podle zjištěných hodnot se objektivním způsobem posuzuje jakost. Navíc normalizovaná zkouška umožňuje reprodukovat výsledky při stejných podmínkách. Tyto zkoušky jsou využívány převážně v oblasti zkoušení kovových materiálů (vrubová houževnatost, rázové zkoušky v tahu, tlaku nebo ohybu**) a na zkoušky umělých hmot (provádí se podle norem [20, 21, 22]). V oblasti textilního zkušebnictví jsou využívány pouze na nitě nebo lana [23].

* kyvadlová kladiva se používají pro rázové zkoušky v tahu, ohybu (Charpyho nebo Amslerovo kladivo)

svislá padací kladiva se používají u rázových zkoušek v tlaku

** metoda Charpy - zkušební těleso je umístěné vodorovně na podpěrách

metoda Izod - zkušební těleso je umístěné jako svislý vetknutý nosník

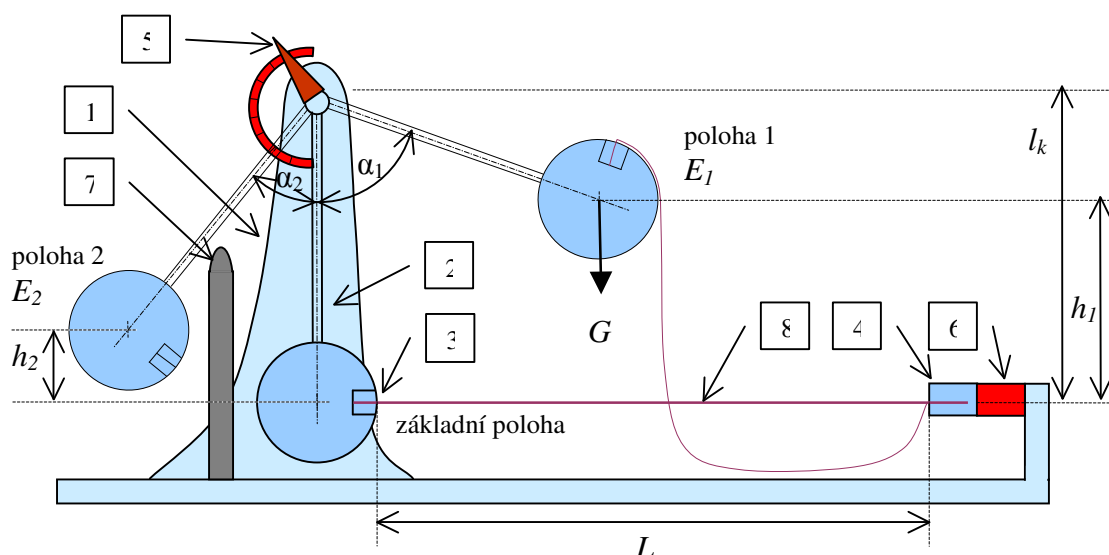
případně je zkušební těleso opatřeno vrubem (kladivo dopadá na stranu protilehlou k vrubu)

Experimentální stanovení hodnoty rázové pevnosti plošné textilie a švů je technickým problémem poměrně obtížně řešitelným. Neexistuje přístroj, který by byl k tomuto účelu komerčně vyráběný. Proto byl navržen a zkonstruován přístroj pro měření rázové pevnosti na laboratorním vzorku.

4.2.2.1 Přístroj pro měření rázové pevnosti

Přístroj CHK/RMI16000 pro měření mechanických charakteristik textilie v dynamických podmínkách byl zkonstruován na principu kyvadlového rázového kladiva, které bylo následně instrumentováno.

Jedná se o laboratorní přístroj (obr. 4.22), který je vyvinutý pro potřeby výzkumu rázového namáhání textilie a jejích spojů. Konstrukce přístroje umožňuje jeho využití pro rázové zkoušky textilního materiálu tahem v laboratorních podmínkách a díky jednoduché obsluze by byl využitelný i v běžných podmínkách každodenní praxe v provozech (pracovní prostor by bylo vhodné opatřit bezpečnostním krytem).



Obrázek 4.22: Schéma laboratorního přístroje pro měření rázové pevnosti

Popis přístroje:

- (1) ... rám
- (2) ... výkyvné kyvadlo
- (3) ... otočná upínací čelist
- (4) ... pevná upínací čelist
- (5) ... úhlová stupnice
- (6) ... měřící soustava
- (7) ... brzda
- (8) ... rovina vypnuté textilie

- l_k ... délka kyvadla
- L ... upínací délka vzorku
- G ... tíhová síla kyvadla
- α_1 ... počáteční úhel výkyvu
- h_1 ... počáteční výška výkyvu
- E_1 ... počáteční potenciální energie
- α_2 ... konečný úhel výkyvu
- h_2 ... konečná výška výkyvu
- E_2 ... konečná potenciální energie

Přístroj se skládá z rámu (1), výkyvného kyvadla (2), upínacích čelistí (3,4), měřících prvků (5,6) a brzdy (7). V příslušenství je závaží pro upínací předpětí a software pro zpracování dat.

Pro konstrukci **rámu** laboratorního přístroje bylo využito masivního litinového stojanu a základní desky z Charpyho kladiva pro zkoušky vrubové houževnatosti kovů, ke které byla zhotovena přídatná konstrukce pro uchycení pevné čelisti pro upínání zkušebních vzorků textilie.

Dále byla využita hřídel, která je ve stojanu uložena pomocí kluzných ložisek a otočné rameno, které je pevně naklínováno na hřídeli. Beran, zavěšený na otočném rameni, byl nahrazen tělesem kyvadla, které má vestavěné čelisti pro uchopení textilního materiálu. Z původního zařízení byla také využita **brzda**, která je složena z pásové brzdy a páky umožňující ovládání brzdy.

Výkyvné kyvadlo je ovládáno manuálně, přístroj umožňuje nastavení 3 poloh počátečních úhlů výkyvu ($\alpha_1 = 44^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) pro různé vzorky. Základní parametry kyvadla jsou hmotnost tělesa kyvadla (m_k) a délka kyvadla, respektive vzdálenost těžiště kyvadla od osy otáčení (l_k). Upínací délka textilie umožňující výkyv kyvadla je nastavena na pevnou hodnotu ($L = 1$ m).

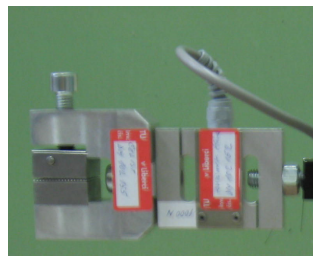
Technické parametry výkyvného kyvadla (výpočet viz příloha 6):

- hmotnost tělesa kyvadla 21,1 kg
- délka kyvadla 0,8025 m
- maximální úhel výkyvu 135°
- maximální energie 283 J
- maximální rázová rychlost 5,2 m/s
- šířka čelisti (šířka vzorku) 34 mm
- upínací délka vzorku 1000 mm
- přesnost odečítání úhlu $0,5^\circ$
- ztráty třením 1,1 % E_{\max}

Upínací čelisti (obr. 4.23) přístroje jsou umístěny ve směru působící síly, přední hrany jsou kolmé k působící síle, upínací plochy jsou v jedné rovině – v rovině vypnuté textilie (8), jsou vroubkované pro spolehlivé udržení vzorku bez prokluzování, ale nesmí prořezávat či jinak poškozovat textilií. Levá čelist je součástí výkyvného kyvadla, pravá je pevná.



a)

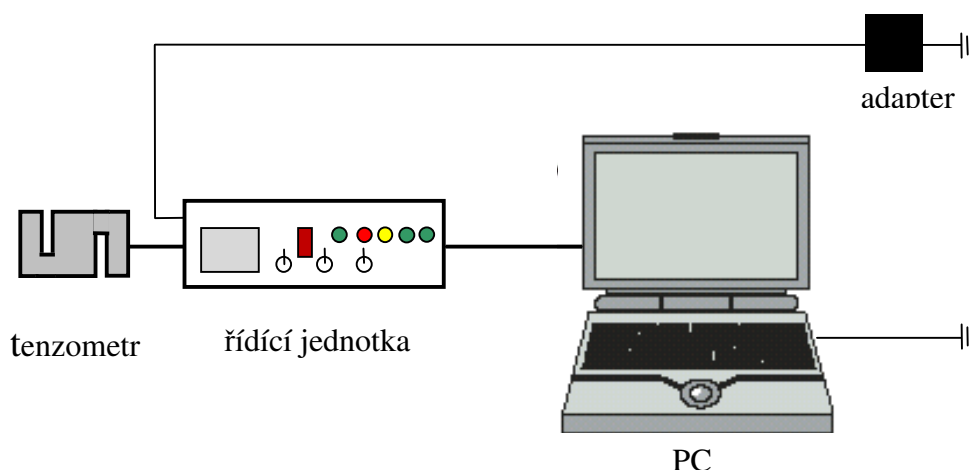


b)

Obrázek 4.23: Upínací čelisti: a) otočná čelist
b) pevná čelist

Mechanickým měřícím prvkem je úhlová stupnice (5), na které je umístěn ukazatel umožňující odečítat úhel výkyvu. Vlečná ručička ukazatele je při pohybu unášena unášečem pevně spjatým s hřídelí. Při pohybu otočného kyvadla ve směru výkyvu se ručička ukazatele pohybuje současně s ramenem kyvadla, její pohyb se zastaví v nejzazší poloze kyvadla odpovídající úhlu α_1 (za předpokladu uvedení ručičky do nulové polohy na počátku výkyvu). Při pohybu otočného kyvadla ve směru překyvu, zabráňuje pohybu ukazatele zarážka, umístěná v bodě 0° . Po ustálení kyvadla v základní (svislé) poloze ukazuje ručička úhel překyvu α_2 .

Elektronická měřící soustava je sestavena z měřících prvků, kterými jsou: měřící jednotka - tenzometrický článek, řídicí jednotka a výpočetní jednotka (viz obr. 4.24).



Obrázek 4.24: Schéma elektronické měřící soustavy

Tenzometrický článek je zabudovaný do měřícího přístroje mezi rám a pevnou čelist (na obr. 4.23b je instrumentovaná pevná čelist). Snímá průběh síly způsobené tahem tělesa kyvadla a převádí ji na měřitelný elektrický výstup (analogový signál). S řídicí jednotkou je propojený kabelem s konektorem gameport (2 kanály zajišťují napájení a přenos hodnot měřené veličiny). V konektoru článku je paměť kalibračních konstant a parametrů článku. Po zapnutí si řídicí jednotka načte kalibrační konstanty a parametry z připojeného článku a použije je pro přesný výpočet okamžité síly.

Byl využit hliníkový odporový tenzometrický snímač síly typu „S“, který je vhodný pro průmyslové aplikace. Základem je pasivní čidlo (polovodičový odporový tenzometr), které měří mechanické prodloužení vodiče tenzometru a tyto změny prodloužení převádí na změny elektrického odporu, jež jsou detekovány snímačem.

Technické parametry tenzometrického článku:

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| • rozsah zatížení | 0-1000 N |
| • přesnost | $\pm 0,02\%$ z rozsahu |
| • bezpečná přetížitelnost | 150% rozsahu |
| • mezní přetížitelnost | 300% rozsahu |
| • teplotní rozsah | -30 až +70°C |
| • vstupní odpor | 415 Ohm ± 15 Ohm |
| • výstupní odpor | 350 Ohm ± 3 Ohm |
| • napájecí napětí | 12 V |

Řídící jednotka slouží pro nastavení průběhu měření a sběr dat. Přijímá signál pro sílu a čas gameportem. Výstup naměřených dat z řídící jednotky je realizován po kabelu s konektorem RS-232, který umožňuje vzájemnou sériovou komunikaci s výpočetní jednotkou (bity přenášených dat jsou vysílány postupně po jediném vodiči – za sebou). Řídící jednotka má DC konektor pro vlastní napájecí zdroj - síťový adapter s výstupním napětím 12V. Připojovací konektory (připojení snímače, výpočetní jednotky a napájecího zdroje) jsou na bočních stranách jednotky.

Ve vyhodnocovací jednotce zařízení RMI16000 je rovněž obsažena paměť kalibračních konstant převodníku a konfiguračních parametrů celého zařízení. Kalibrace zařízení se provádí v nastavovacím režimu přes sériový port pomocí PC a kalibračního software.

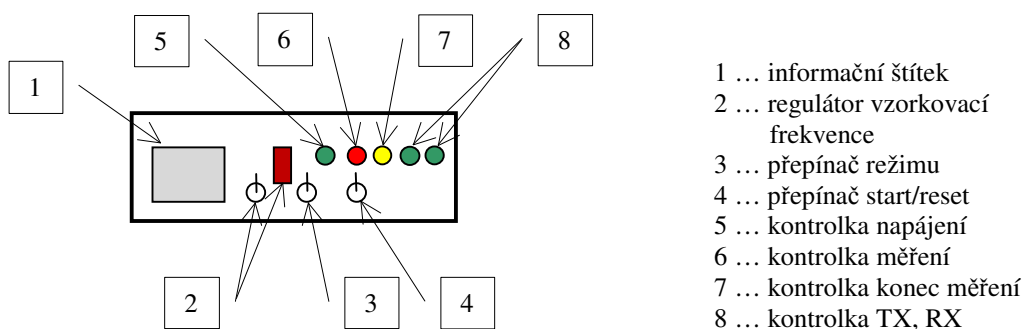
Nastavení průběhu měření je prováděno pomocí *ovládacího panelu* (obr. 4.25), který obsahuje ovládací a indikační prvky a informační štítek (tabulka s údaji pro nastavení vzorkovací frekvence).

Ovládací prvky jsou:

- přepínač režimu (dvě polohy – pro nastavování a pro měření)
- ovladač pro nastavení vzorkovací frekvence (volitelný systém v rozsahu 28,125 - 16000 Hz, nastavitelný v 19 krocích)
- přepínač start/reset pro přípravu systému na spuštění nového měření

Indikační prvky jsou:

- kontrolka napájení
- kontrolka měření (indikace sepnutí vstupu start měření a indikace průběhu měření)
- kontrolka konec měření
- kontrolka TX a RX (indikace přenosu dat – transmit data, receive data)



Obrázek 4.25: Schematické znázornění ovládacího panelu řídící jednotky

Řídící jednotka řídí frekvenci snímání dat a zaznamenává v krátkém časovém okamžiku do paměti průběh síly z tenzometrického snímače v reálném čase. Snímání hodnot je započato nárůstem síly na tenzometrickém snímači a ukončeno po zaplnění paměti. Množství dat je dáno nastavenou vzorkovací frekvencí a velikostí paměti řídící jednotky.

Spuštění jednotky je prováděno ručně (přepínačem start/reset), k měřicí soustavě by bylo možno doplnit indukční snímač polohy tělesa kyvadla pro automatické spuštění měření pohybem kovového předmětu kolem tohoto snímače nebo spouštět řídící jednotku automaticky po nárůstu síly na tenzometrickém snímači pomocí softwaru.

Technické parametry řídicí jednotky:

- rozsah vzorkovací frekvence: 28,125 - 16000 Hz
- rozlišení naměřených hodnot 2500 dílků (0,4N)
- paměť pro uložení naměřených dat 262 hodnot
- automatická indikace
 - kontrola připojení siloměrného článku
 - kontrola načítání jeho parametrů do systému
- napájecí napětí 230V/50Hz (adapter 230V/ 12V/500mA)
- kompatibilita s PC Windows 2000, Windows XP, Linux

Výpočetní jednotka slouží pro vyhodnocování a zpracování dat. Lze využít jakýkoli počítač (event. notebook) se sériovým portem RS-232 (event. USB), s operačními systémy Windows 2000, Windows XP, Linux.

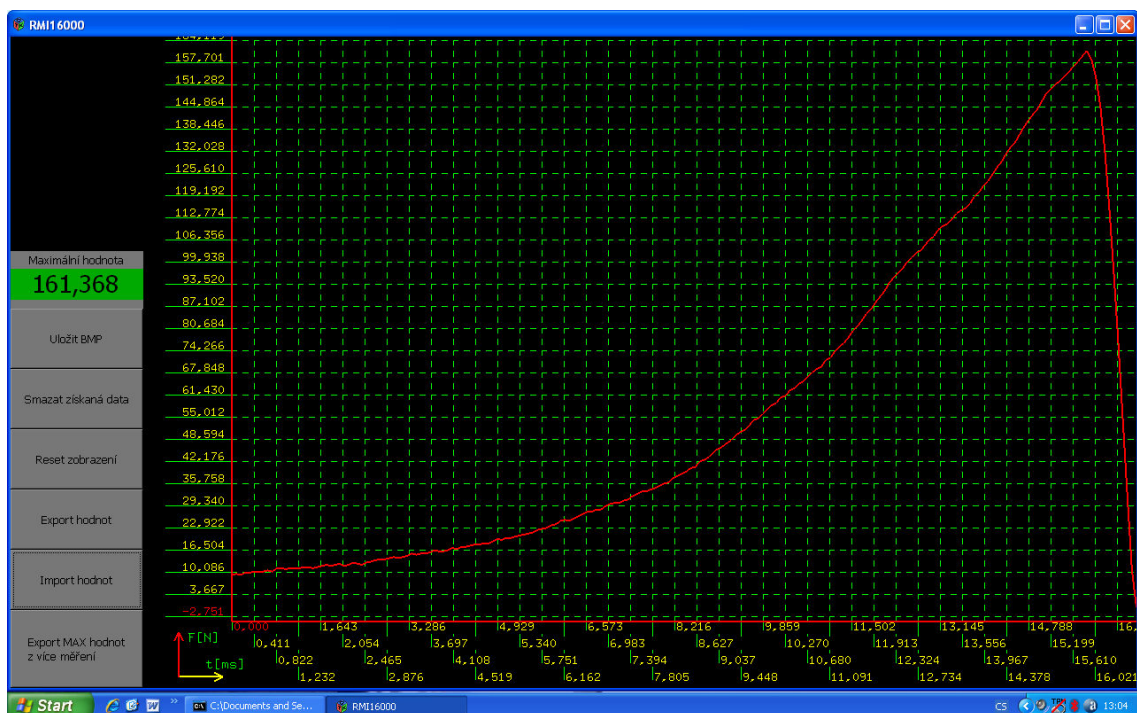
Aplikační software je vytvořen pod architekturou systému DOS. Software po ukončení měření automaticky načte naměřené hodnoty z řídicí jednotky, zobrazí naměřené hodnoty, vyhledá a zobrazí maximální sílu, zobrazí grafické znázornění naměřených hodnot - závislost síly na čase (obr. 4.26). Software dále umožňuje práci s daty (viz příloha 7) – uložení naměřených hodnot do souboru XLS v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, uložení maximální síly z daného měření nebo z více měření do (jiného) souboru XLS, uložení grafu ve formě bitmapy pro další použití – pomocí příkazů jež otevrou okno s rozšířenými možnostmi uložení (obr. 4.27). Výstupem je tabulka naměřených hodnot s vyhodnocením nejvyšší dosažené síly, pracovní diagram závislosti síly na čase (příklad viz obr. 4.28, 4.29)

Poznámka 1:

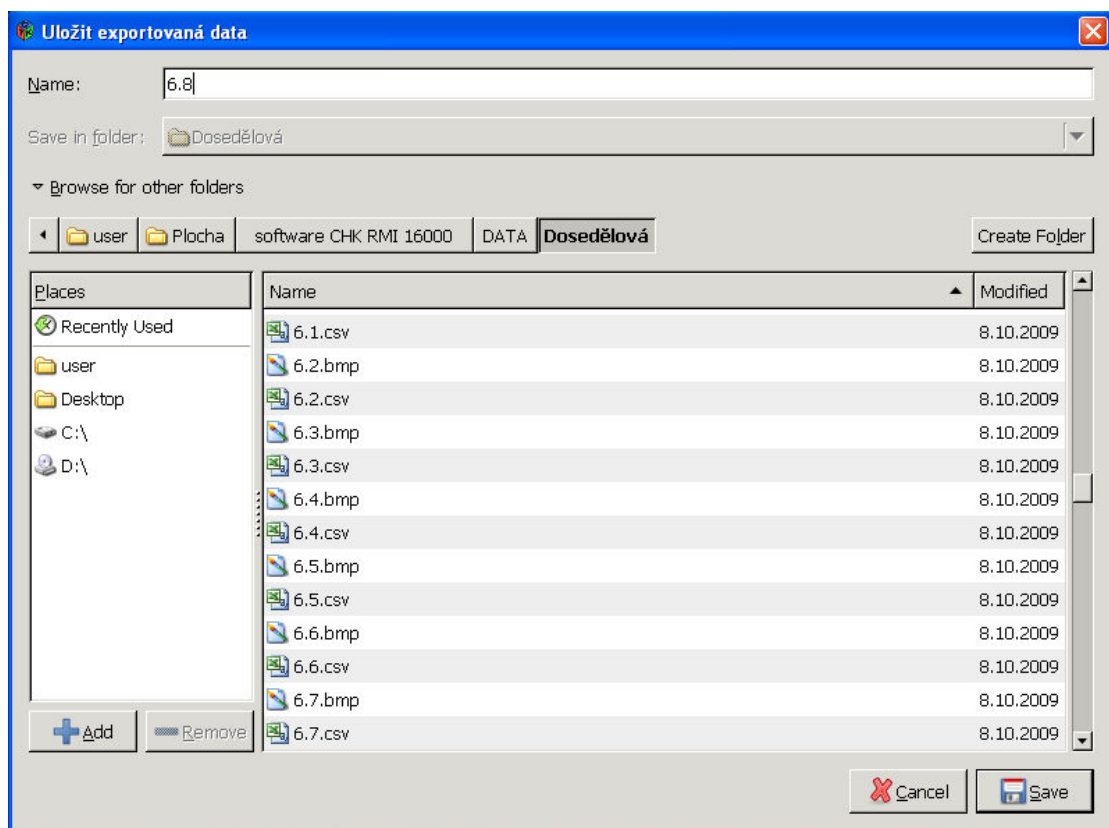
Návod na měření na laboratorním přístroji (nastavení řídicí jednotky a práce s daty) je uveden v příloze 7.

Poznámka 2:

Zařízení je navrženo tak, aby bylo rozšiřitelné o impulsní snímač polohy. Zabudováním snímače, který by snímal polohu otočného ramene kyvadla v závislosti na čase, a vyloučením časové osy by bylo možno získat závislost síly na prodloužení a integrací plochy pod křivkou zjistit deformační práci pro deformaci nebo destrukci vzorku.



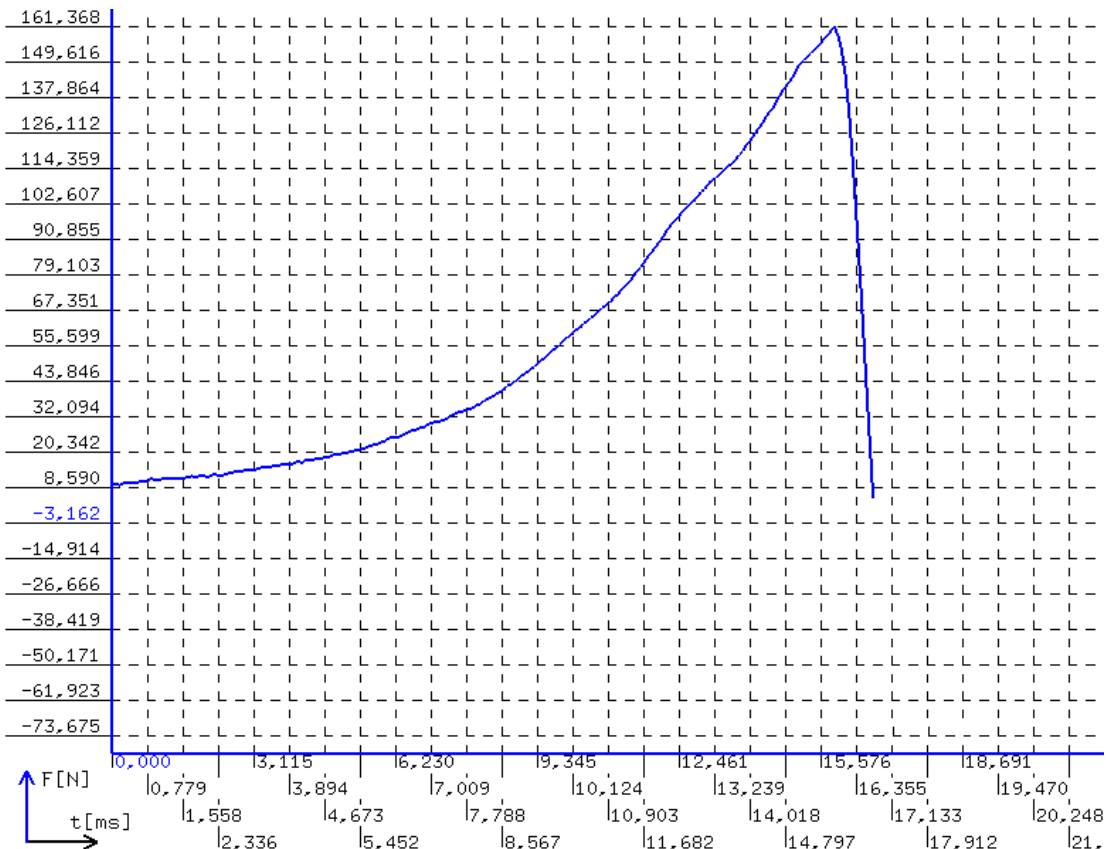
Obrázek 4.26: Zobrazení maximální hodnoty síly a závislosti působící síly na čase v aplikačním programu



Obrázek 4.27: Okno otevřené příkazem uložit data

t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	t[ms]	F[N]	Fmax[N]
0,000	9,453	2,506	13,039	5,013	19,559	7,519	32,925	10,026	58,679	12,532	100,081	15,039	146,698	161,368
0,083	9,779	2,590	13,365	5,096	20,211	7,603	33,577	10,109	59,331	12,616	101,385	15,122	148,980	
0,167	9,453	2,673	13,691	5,180	20,211	7,686	33,577	10,193	60,961	12,699	102,689	15,206	150,284	
0,250	10,105	2,757	14,017	5,263	20,537	7,770	34,229	10,276	61,287	12,783	103,340	15,289	151,588	
0,334	10,105	2,840	14,017	5,347	20,863	7,853	34,555	10,360	62,917	12,866	104,970	15,373	152,566	
0,417	10,431	2,924	14,343	5,430	21,189	7,937	35,207	10,443	63,569	12,950	106,600	15,456	153,870	
0,501	10,431	3,007	14,669	5,514	21,515	8,020	35,859	10,527	64,873	13,033	107,578	15,540	155,174	
0,584	10,431	3,091	14,343	5,597	21,841	8,104	36,185	10,610	65,525	13,117	109,534	15,623	156,804	
0,668	10,757	3,174	14,669	5,681	22,493	8,187	37,489	10,694	66,829	13,200	110,512	15,707	158,108	
0,751	10,431	3,258	14,995	5,764	22,819	8,271	38,141	10,777	68,133	13,284	111,164	15,791	159,738	
0,835	11,409	3,342	15,647	5,848	23,145	8,355	38,793	10,861	69,111	13,368	112,468	15,874	161,368	
0,919	11,409	3,425	15,321	5,932	23,797	8,438	39,445	10,945	69,763	13,451	114,098	15,958	158,760	
1,002	11,083	3,509	15,647	6,015	24,123	8,522	40,423	11,028	71,719	13,535	115,076	16,041	153,544	
1,086	11,409	3,592	15,647	6,099	25,101	8,605	40,749	11,112	72,371	13,618	115,728	16,125	145,068	
1,169	11,409	3,676	15,973	6,182	25,427	8,689	42,379	11,195	74,327	13,702	117,032	16,208	132,028	
1,253	11,409	3,759	16,625	6,266	25,101	8,772	42,705	11,279	75,631	13,785	118,988	16,292	115,076	
1,336	11,735	3,843	16,299	6,349	25,753	8,856	43,683	11,362	76,609	13,869	120,292	16,375	96,169	
1,420	11,735	3,926	16,299	6,433	26,405	8,939	44,987	11,446	78,239	13,952	122,248	16,459	75,957	
1,503	11,409	4,010	16,625	6,516	27,057	9,023	45,965	11,529	80,195	14,036	123,552	16,542	53,789	
1,587	11,735	4,093	17,277	6,600	27,709	9,106	46,617	11,613	81,499	14,120	125,508	16,626	31,947	
1,671	12,061	4,177	16,951	6,684	27,709	9,190	47,595	11,697	83,129	14,203	127,464	16,710	10,757	
1,754	12,387	4,261	17,603	6,767	28,361	9,274	48,573	11,780	85,085	14,287	129,094	16,793	0,000	
1,838	12,061	4,344	17,603	6,851	28,361	9,357	49,877	11,864	86,389	14,370	131,376			
1,921	12,387	4,428	17,929	6,934	29,339	9,441	50,855	11,947	88,345	14,454	133,332			
2,005	12,713	4,511	18,255	7,018	29,991	9,524	51,507	12,031	89,975	14,537	134,636			
2,088	12,061	4,595	18,255	7,101	30,317	9,608	52,811	12,114	91,605	14,621	136,918			
2,172	12,387	4,678	18,581	7,185	30,317	9,691	54,441	12,198	93,887	14,704	139,200			
2,255	13,039	4,762	18,581	7,268	30,969	9,775	54,767	12,281	95,517	14,788	141,156			
2,339	12,713	4,845	19,233	7,352	31,295	9,858	56,071	12,365	96,821	14,871	142,786			
2,422	12,387	4,929	19,885	7,435	32,273	9,942	57,375	12,449	98,125	14,955	144,416			

Obrázek 4.28: Výstupní tabulka hodnot z jednoho měření



Obrázek 4.29: Výstupní diagram z jednoho měření

4.2.2.2 Návrh metody měření rázové pevnosti

Podstata metody

Zkouška spočívá v namáhání zkušebních vzorků plošné textilie (textile se švem) rázovou silou, působící definovaným směrem (ve směru struktury materiálu, kolmo ke švu apod.). Zkušební vzorek má stanoveny rozměry, typ a polohu spoje.

Vyhodnocuje se maximální nárazová síla, impulz nárazové síly a deformační práce nutná k přetrhu textilie (spoje). Zkouška umožňuje sledovat změnu síly v průběhu rázového působení pomocí grafického znázornění naměřených dat.

Princip metody

Vzorek se upevňuje do čelistí v dolní základní poloze. Vykývnutím otočné čelisti do výšky h_1 (respektive o úhel α_1) získá čelist potenciální energii E_{P1} .

Spuštěním se potenciální energie přeměňuje na kinetickou energii, která je nejvyšší v dolní poloze, odpovídající vypnutému vzorku. Po vypnutí vzorku bude impuls síly působit rázově ve směru délky vzorku, kolmo ke švu.

V nejnižším místě dojde k přetržení vzorku, kyvadlo se zhoupne do opačné polohy do výšky h_2 (respektive o úhel α_2 , který se zaznamená na stupnici) odpovídající zbytkové energii E_{P2} . Pro rázovou pevnost je určující maximální působící síla a energetická bilance.

Spotřebovaná energie je dána rozdílem:

$$E_{def} = E_{P1} - E_{P2} = m_k g (h_1 - h_2) \quad (4.149)$$

Úbytek energie je přímo úměrný spotřebované deformační práci. Z rozdílu počátečního a koncového stavu a známých goniometrických vztahů

$$\begin{aligned} h_1 &= l_k (1 - \cos \alpha_1) \\ h_2 &= l_k (1 - \cos \alpha_2) \end{aligned} \quad (4.150)$$

získáme výpočtový model pro spotřebovanou deformační práci při rázovém namáhání:

$$A_{def}^R = M_k (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (4.151)$$

kde: $M_k \dots$ je moment kyvadla daný vztahem:

$$M_k = m_k g l_k \quad (4.152)$$

Základem pro výpočet deformační práce je hodnota počátečního nastavovaného úhlu výkyvu (α_1) a koncového úhlu překyvu (α_2) při známé hmotnosti a délce kyvadla (m_k, l_k).

Měřicí soustava zaznamenává průběh síly v závislosti na čase, ze záznamu se odečítá hodnota maximální síly a vypočítá impulz rázové síly (viz kapitola 4.2.2.3).

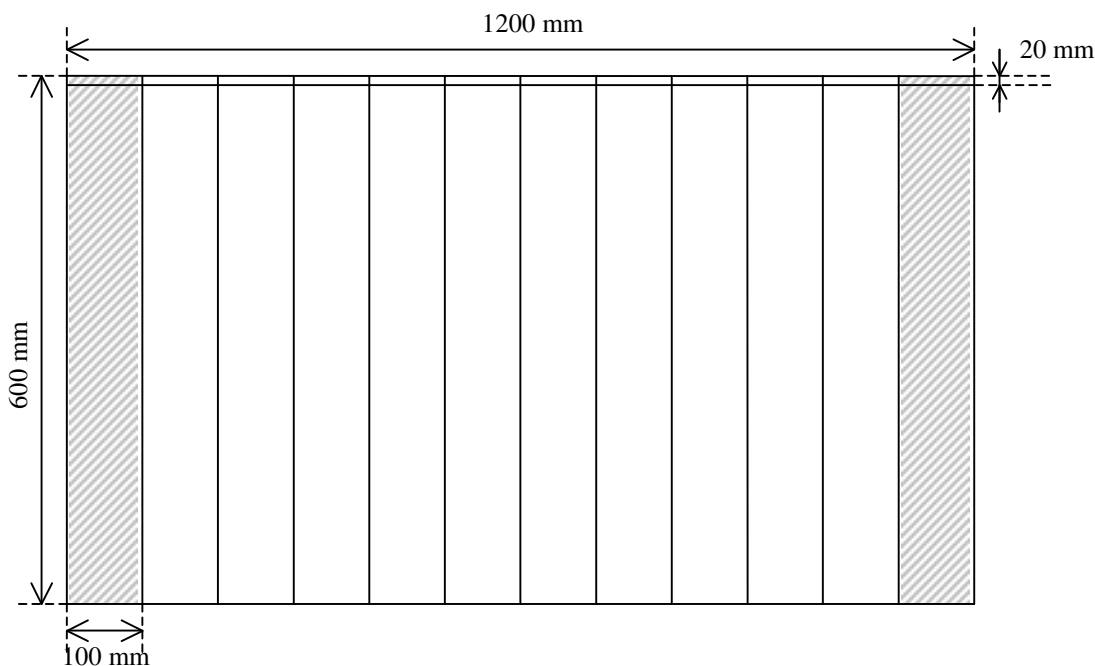
Příprava vzorků

Vzorky se připravují dle normy ČSN EN ISO 13935-1 s následujícími rozdíly.

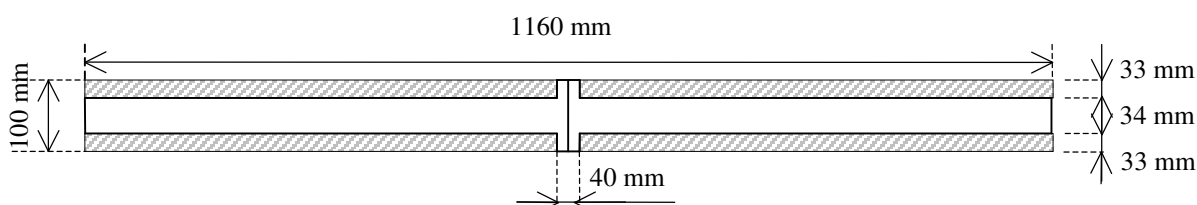
Laboratorní vzorek (obr. 4.30) se zhotoví z textilie o rozměrech 1200mm x 1200mm, která se složí na polovinu do přehybu tak, aby hrana skladu byla rovnoběžná se směrem osnovy nebo útku (nebo dle zvláštního požadavku koso pod definovaným úhlem). Ve stanovené vzdálenosti od přehybu (obvykle 20mm) se zhotoví požadovaný šev.

Před sešitím švu je vzorek v přehybu rozstřížen (u přeplátovaných švů je přeložen). Švy jsou šity dle požadavku na parametry stehu a švu. Šicí stroj musí být správně seřízen, šití musí být rovné a jednotlivé nitě musí být dokonale provázány od začátku až do konce šití.

Z obou bočních stran laboratorního vzorku se odstříhne 100mm do odpadu. Ze zbylé části laboratorního vzorku se vystříhne sada deseti zkušebních vzorků 100 mm x 1160 mm a upraví vystřížením na požadovaný tvar (obr. 4.31). Každý zkušební vzorek se čtyřikrát nastříhne ve vzdálenosti 20 mm od švu do hloubky 33 mm. Zbytek materiálu se odstříhne, tak aby skutečná šířka vzorku byla 34 mm. Délka vzorku je dle druhu švu (obvykle 1160 mm).



Obrázek 4.30: Laboratorní vzorek pro rázovou zkoušku



Obrázek 4.31: Zkušební vzorek pro rázovou zkoušku

Postup měření:

Upevníme zkušební vzorek do čelistí kyvadla spuštěného do základní svislé polohy. Dále upevníme vzorek do pevných čelistí tak, aby byl vzorek vypnutý – k tomu slouží předpětí pomocí malého závaží (50g).

Kyvadlo vychýlíme o daný úhel (α_1) a zajistíme aretační zarážkou (obr. 4.22 poloha 1). Spustíme měřicí soustavu (na řídicí jednotce je nastaven režim měření a rychlost vzorkování – viz příloha 7).

Odjistíme aretaci výkyvné čelisti. Po uvolnění zarážky kladivo volně padá po kruhové dráze, polohová energie kyvadla se přemění na kinetickou. V dolní poloze působíme na vzorek rázovou silou – dojde k přetržení textilie (švu) a vychýlení kyvadla na opačnou stranu (obr. 4.22 poloha 2).

Měřicí soustava zaznamená průběh síly v závislosti na čase a vyhodnotí maximální sílu. Na stupnici se odečte velikost úhlu (α_2), který odpovídá zbytkové energii.

Pokud by došlo k přetržení textilie u čelisti, musí být tyto výsledky vyloučeny a musí být provedeny nové zkoušky, tak aby bylo získáno nejméně deset přetrhů ve švu.

Doporučený obsah zkušebního protokolu:

Záhlaví – základní údaje o měření

- název protokolu
- kdo protokol vypracoval
- datum měření
- event. klimatické podmínky

Teoretická část – vstupní údaje pro měření

- úkol měření
- popis měřících přístrojů a pomůcky
 - typ přístroje, použité měřicí ústrojí
 - parametry přístroje (rozsah, přesnost, ...)
 - použité nastavení přístroje
- informace o přípravě vzorků
 - identifikaci použitého materiálu (šitý materiál, šicí nit – druh, složení, vazba, jemnost, konstrukce, ...)
 - charakteristiku použité techniky (šicí stroj, jehla, ...)
 - specifikace švů (typ a parametry stehu a švu, odkaz na normu ISO 4915:1991, ISO 4916:1982)
 - postup zhotovení vzorků (směr odebrání vzorku textilie a polohu spoje)
- postup zkoušky
- postup zpracování dat – statistické zpracování, základní vztahy s popisem veličin a jednotkami

Praktická část – údaje o hodnotách dynamických charakteristik

- výsledky měření - tabulky naměřených hodnot, počet neplatných měření a zdůvodnění, event. pozorované neobvyklé chování
- výpočty
- tabulky vypočtených hodnot
- grafy

Závěr – slovní vyhodnocení měření

4.2.2.3 Základní dynamické charakteristiky

Základní dynamickou charakteristikou pro vyhodnocení rázové pevnosti vzorku je **mez pevnosti v rázu** F^R_{max} jako hodnota maximální působící síly.

Určuje se automaticky (pomocí softwaru - kap. 4.2.2.1) ze záznamu hodnot působící rázové síly snímaných s vysokou frekvencí v průběhu zkoušky.

Další charakteristikou, která stanoví účinek nárazové síly je **impulz rázové síly** I^R , který lze určit:

- 1) Dle vztahu (4.78), pokud aproximací závislosti síly na čase vyjádříme funkci $F(t)$ analyticky (např. MNC). Hledanou funkci vyjádříme ve tvaru polynomu:

$$F(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m \quad (4.153)$$

kde $m < n$, kde n je počet zaznamenaných hodnot.

Koeficienty určíme z podmínky minima funkcionálu:

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = 0 \quad (4.154)$$

$$\text{kde } F = \sum_{i=0}^n (f(t_i) - F(t_i))^2 \quad (4.155)$$

kde: $f(t_i)$... skutečné hodnoty působící síly [N]

$F(t_i)$... aproximované hodnoty působící síly [N]

Dostaneme $m+1$ lineárních algebraických rovnic s neznámými koeficienty a_k , $k=0, \dots, m$

- 2) Z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech v průběhu rázového namáhání – integrál nahradíme sumací elementárních ploch a I^R určíme vztahem:

$$I^R = \sum_{i=0}^n \frac{(f(t_i) + f(t_{i+1}))(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (4.156)$$

kde: $f(t_i)$.. hodnoty působící síly [N]

t_i hodnoty času [s]

- 3) Event. z grafického záznamu stanovíme skutečnou velikost plochy ohraničené tahovou křivkou a osou x pomocí planimetru a velikost práce určíme vztahem:

$$I^R = S \cdot m_x \cdot m_y \quad (4.157)$$

kde: S ... je plocha pod tahovou křivkou

m_x ... je modul na ose x

m_y ... je modul na ose y *

* Při stanovení modulu vycházíme z toho že, skutečná délka na dané ose vynásobena modulem osy odpovídá reálné naměřené hodnotě:

$$x \cdot m_x = \Delta t \quad (4.158)$$

$$y \cdot m_y = F \quad (4.159)$$

kde: x skutečná délka na ose x [mm]
 y skutečná délka na ose y [mm]
 Δt ... naměřený čas [mm]
 F ... naměřená síla [N]

Deformační práce pro rázové namáhání A_{def}^R vyjadřuje energii spotřebovanou k deformaci či destrukci rázově namáhaného vzorku. Vypočítáme ji z rozdílu potenciální energie dle vztahů (4.151, 4.152) a známých parametrů kyvadla (kap. 4.2.2.1):

$$A_{def}^R = 166,11(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (4.160)$$

Hodnoty spotřebované deformační práce naměřené při dynamických zkouškách se liší od hodnot naměřených při statických zkouškách. Tento rozdíl v chování materiálu číselně vyjadřuje **součinitel dynamického působení** C_d

$$C_d = \frac{A_{def}^S}{A_{def}^R} \quad (4.161)$$

kde: A_{def}^S ... je střední hodnota deformační práce při statickém namáhání [J]
 A_{def}^R ... je střední hodnota deformační práce při rázovém namáhání [J]

Pro vyhodnocení tohoto součinitele je třeba určit deformační práci A_{def}^S potřebnou k přetržení vzorku při quasistatickém namáhání provedeném dle normy ISO 13935.

Spotřebovaná deformační práce zde odpovídá práci vykonané měnící se silou F po dráze Δl :

$$A_{def}^S = \int_{\Delta l} F(l) \cdot dl \quad (4.162)$$

kde integrál představuje obsah obrazce ohraničeného grafem funkce $F(l)$, jejíž průběh je dán tahovou křivkou, dráha odpovídá prodloužení vzorku.

A_{def}^S lze určit ze záznamu průběhu statické zkoušky:

- 1) Z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech při průběhu statické zkoušky - integrál nahradíme sumací elementárních ploch a A_{def}^S určíme vztahem:

$$A_{def}^S = \sum_{i=0}^n \frac{(f(x_i) + f(x_{i+1}))(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (4.163)$$

kde: $f(x_i)$.. jsou hodnoty působící síly [N]
 x_i jsou hodnoty prodloužení vzorku [m]

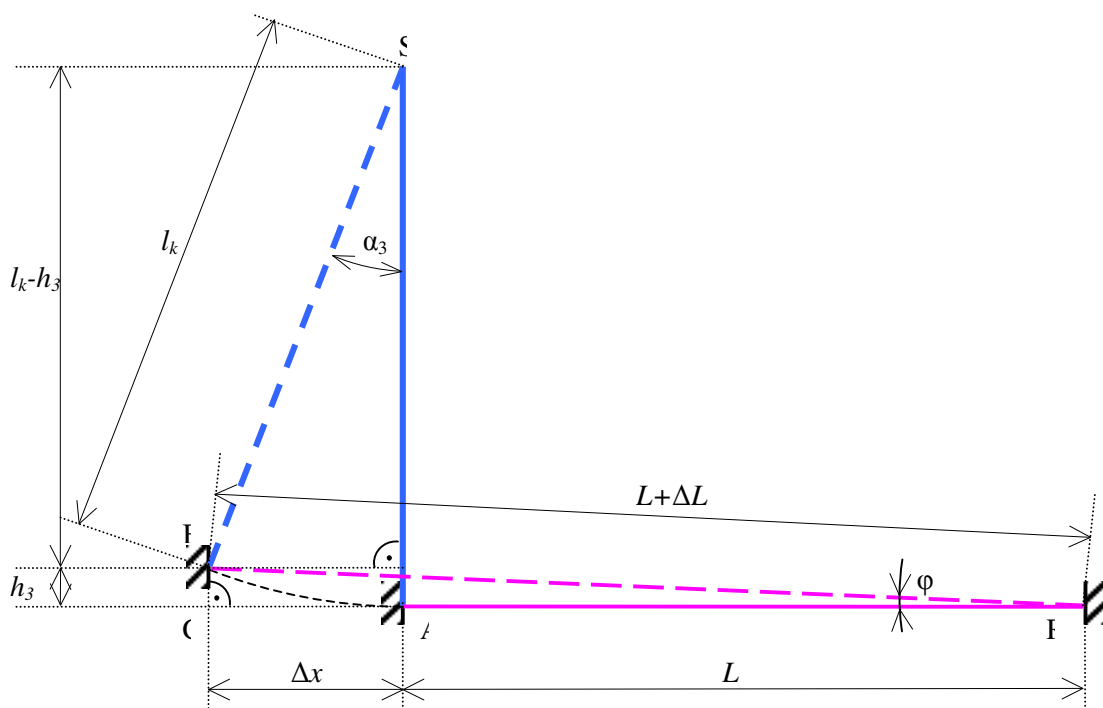
- 2) Aproximací pracovního diagramu – vyjádříme funkci $F(l)$ analyticky a využijeme vztahu (4.162).
- 3) Event. z grafického záznamu stanovíme skutečnou velikost plochy ohraničené tahovou křivkou a osou x pomocí planimetru.

Pro výpočet relativního prodloužení vzorku ε vyjdeme ze vztahu

kde: ΔL ... absolutní prodloužení [mm]
 L ... upínací délka vzorku [mm]

Kamera zaznamená úhel překyvu α_3 při přetrhu vzorku. Absolutní prodloužení vzorku pak vypočteme z geometrie deformovaného vzorku v okamžiku přetrhu při rázovém namáhání (obr. 4.32).

Kyvadlo působí na vzorek délky $L = |AR|$ rázově v bodě A. Vzorek se do přetruh prodlouží o ΔL , konec vzorku se přesune z bodu A (ve výšce $h_0 = 0$) do bodu B (ve výšce h_3).



Obrázek 4.32: Geometrie vypnutého vzorku v okamžiku přetruhu

Pro výpočet absolutního prodloužení ΔL vyjdeme z goniometrických vztahů pro úhly α_3 a φ (viz obr. 4.32)

$$\cos \alpha_3 = \frac{l_k - h_3}{l_k} \quad (4.165)$$

$$\sin \varphi = \frac{h_3}{L + \Delta L} \quad (4.166)$$

kde: α_3 ... úhel překyv v okamžiku přetrhu vzorku
 l_k ... délka kyvadla [mm]
 h_3 ... výška překyv v okamžiku přetrhu vzorku [mm]
 φ ... úhel rovin vypnuté textilie od počátku rázu po přetrh
 L ... upínací délka vzorku [mm]
 ΔL ... absolutní prodloužení [mm]

Z prvního vztahu určíme výšku překyv h_3 a dosazením do druhého vztahu určíme absolutního prodloužení ΔL

$$\Delta L = \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{\sin \varphi} - L \quad (4.167)$$

Úhel φ určíme ze vztahu

$$\varphi = \arctg \frac{h_3}{L + \Delta x} \quad (4.168)$$

kde h_3 určíme ze vztahu (4.165) a Δx ze vztahu (viz obr. 4.32)

$$\Delta x = l_k \sin \alpha_3 \quad (4.169)$$

Po úpravě vyjde pro absolutní prodloužení

$$\Delta L = \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{\sin \left[\arctg \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{L + l_k \sin \alpha_3} \right]} - L \quad (4.170)$$

a pro relativní prodloužení

$$\varepsilon = \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{L \cdot \sin \left[\arctg \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{L + l_k \sin \alpha_3} \right]} - 1 \quad (4.171)$$

Vztah lze zjednodušit pro malé úhly (do 5°). Ze vztahů (4.165) a (4.166) platí pro výšku překyvu h_3

$$h_3 = l_k (1 - \cos \alpha_3) \quad (4.172)$$

$$h_3 = (L + \Delta L) \sin \varphi \quad (4.173)$$

Pro malé úhly (platí, že $\sin \varphi \approx 0$ a $\cos \alpha_3 \approx 1$) bude výška h_3 malá ($h_3 \approx 0$) a lze ji zanedbat. Pak vzdálenost SB, odpovídající délce kyvadla l_k , je téměř rovna vzdálenosti SC, (resp. B→C) a také vzdálenost RB, odpovídající délce prodlouženého vzorku $(L + \Delta L)$, je téměř rovna vzdálenosti RC, proto platí

$$\begin{aligned} RC &= RA + CA \\ L + \Delta L &= L + \Delta x \\ \text{resp. } \Delta L &= \Delta x \end{aligned} \quad (4.174)$$

Absolutní prodloužení ΔL lze v tomto případě určit ze vztahu

$$\Delta L^* = l_k \cdot \sin \alpha_3 \quad (4.175)$$

a relativní prodloužení ze vztahu

$$\varepsilon^* = \frac{l_k \cdot \sin \alpha_3}{L} \quad (4.176)$$

Pro větší úhly je třeba určit úhel φ ze vztahu (4.168).

4.2.3 Experimentální analýza dynamických charakteristik

Metodou modelování vzorků a simulací jejich rázového namáhání je možno nejen stanovit dynamické charakteristiky pro různé typy použitých materiálů a švů, ale také sledovat závislost těchto charakteristik na možných ovlivňujících činitelích jako jsou parametry stehu nebo švu, poloha spoje či pomocí optických metod sledovat deformaci rázově namáhaného vzorku.

Dále uvedené rozbory mají charakter porovnávacích experimentů pro ověřování určitých otázek či předpokladů (např. jaký je rozdíl spotřebované deformační práce při rázovém a quasistatickém namáhání, jestli pevnost spoje závisí na jeho poloze, jak se projeví růst odporu proti namáhání, o kolik je menší deformace apod.).

Experimentální analýza je založena na tvorbě vhodně definovaných textilních vzorků a předpokládá možnost využití techniky umožňující snímání sil a deformací vzorků plošných textilií v dynamických podmínkách. Experimentální analýza vychází z prvotního vyhodnocení zkoušek textilních vzorků se spoji různých struktur – tj. ze stanovení velikosti úhlu překyvu a maximální působící síly, dále ze snímání hodnot síly v reálném čase (případně též sledování a snímání deformace v reálném čase). Další vyhodnocení představuje stanovení dynamických charakteristik pro jednotlivé vzorky - vychází z výpočtu úbytku polohové energie, ze zobrazení záznamů do grafických křivek a zjišťování velikostí ploch pod křivkou.

4.2.3.1 Experimentální stanovení součinitele dynamického působení

Cílem experimentálního měření je stanovit charakteristiky deformační práce a součinitel dynamického působení a dále posoudit vliv vstupních parametrů technologického vypracování spoje na výsledné dynamické charakteristiky.

Na hodnoty spotřebované deformační práce a součinitele dynamického působení má vliv celý soubor determinačních faktorů (kap. 3.2), proto jsou vyhodnocované charakteristiky platné vždy pro zvolenou konfiguraci materiálu. Metodou uvedenou v kap. 4.2.2.2 a postupem uvedeným v 4.2.2.3 byly testovány vytypované druhy švů, výsledky průměrných naměřených hodnot deformační práce a odpovídajících součinitelů jsou uvedeny v tabulce 4.9 (specifikace švů a kompletní výsledky měření viz příloha 8).

Tabulka 4.9: Hodnota součinitelů dynamického působení v závislosti na druhu švu

sledovaný faktor	šev/steh	počet/vzdálenost stehových řádků	A_{def}^R [J]	A_{def}^S [J]	C_d
prostorové uspořádání vrstev	1.01.01/301	1 / 0 mm	2,348	1,199	0,51
	2.01.01/301	1 / 0 mm	2,447	1,249	0,51
	2.02.01/301	1 / 0 mm	3,134	1,605	0,51
	2.04.01/301	1 / 0 mm	3,134	1,648	0,53
počet stehových řádků	2.01.01/301	1 / 0 mm	2,447	1,249	0,51
	2.01.03/301	2 / 2 mm	4,687	3,003	0,64
	2.01.07/301	3 / 2 mm	5,932	5,195	0,88
vzdálenost stehových řad	2.01.03/301	2 / 2 mm	4,687	3,003	0,64
	2.01.03/301	2 / 4 mm	4,880	3,095	0,63
	2.01.03/301	2 / 6 mm	5,072	3,198	0,63

Sérií testů byl sledován vliv prostorového uspořádání spojovaných vrstev (stanovením součinitele C_d pro jednořádkové hřbetové a přeplátované švy se stehem 301), vliv počtu stehových řádků (stanovením součinitele C_d pro přeplátované švy se stehem 301) a vzdálenosti stehových řádků (stanovením součinitele C_d pro dvouřádkové přeplátované švy s rozdílnou vzdáleností stehových řad).

Výsledky provedených měření dokumentují vliv sledovaných determinačních faktorů a dále předkládají fakt, že A_{def}^R je u sledovaných spojů větší než A_{def}^S a součinitel C_d nabývá hodnoty nižší než 1. To znamená, že průběh působící síly v závislosti na deformaci je jiný. Pokud při rázovém namáhání roste odpor proti deformaci, musí být vyšší rázově působící síly.

Nejvýznamnější vliv na hodnoty deformační práce (jak rázové, tak quasistatické) a také na hodnotu součinitele dynamického působení měl počet stehových řádků ve švu. S počtem stehových řádků (u přeplátovaných švů) roste spotřeba deformační práce a roste také součinitel dynamického působení.

Méně významný vliv se projevil u prostorového uspořádání vrstev spojovaného materiálu. I zde se projevil tendence, že se složitější konfigurací roste spotřeba deformační práce a součinitel dynamického působení.

Rozdílná vzdálenost stehových řad měla na součinitel dynamického působení jen nepatrný vliv.

Závěrem lze vyslovit domněnku, že pevnější švy budou mít vyšší součinitel než švy méně pevné. Svou roli zde patrně sehrává větší deformace materiálu, ke které dochází při quasistatickém namáhání.

4.2.3.2 Experimentální analýza závislosti rázové pevnosti na poloze spoje

Rázová pevnost spoje je závislá na řadě faktorů (použité materiály, parametry šití). Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o přenos napěťových vln materiálem, je otázkou, zda bude také závislá i na poloze spoje ve výrobku, resp. na vzdálenosti spoje od místa vzniku rázového napětí.

Cílem experimentální metody měření bylo posouzení možného vlivu polohy spoje ve výrobku na výslednou rázovou pevnost. Dle projevu sledované vlastnosti pak vyjádřit doporučení pro systém projektování.

Experimentální metoda vychází z namáhání zkušebních vzorků plošné textilie se švem rázovou silou, působící kolmo ke švu. Zkušební vzorek má stanoveny rozměry a polohu spoje, tak aby bylo možno vyhodnotit závislost rázové pevnosti spoje na jeho poloze vzhledem k místu vzniku rázového napětí (příprava vzorků viz příloha 9).

Na základě naměřených hodnot konečného úhlu výkyvu α_2 byla stanovena průměrná deformační práce A_{def}^R pro každou sadu různě umístěných spojů (výsledky průměrných vypočtených hodnot jsou v tabulce 4.10, naměřené hodnoty viz příloha 9).

Ze záznamů průběhu zkoušek byly odečteny hodnoty maximální rázové síly pro každý zkušební vzorek a pro každou sadu zkušebních vzorků byla vypočtena velikost průměrné maximální rázové síly nutné k přetrhu spoje F_{max}^R (výsledky průměrných naměřených hodnot jsou v tabulce 4.10, naměřené hodnoty viz příloha 9).

Impuls rázové síly byl stanoven z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech v průběhu rázového namáhání. Dále byl stanoven průměrný impuls rázové

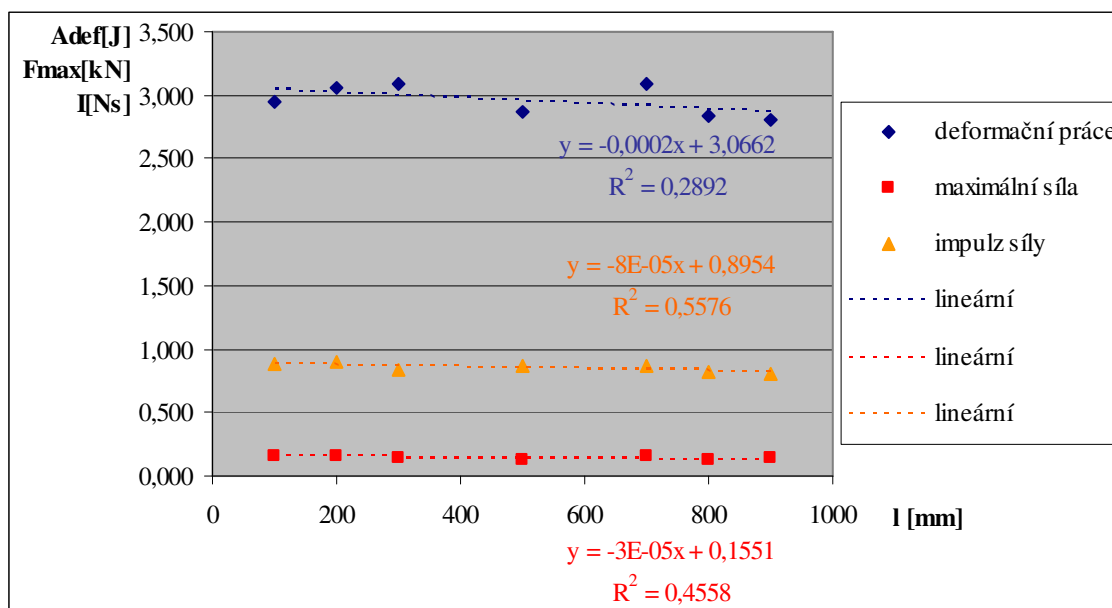
síly I^R pro každou sadu zkušebních vzorků (výsledky průměrných hodnot jsou v tabulce 4.10, naměřené hodnoty viz příloha 9).

Tabulka 4.10: Průměrné hodnoty z naměřených a vypočtených hodnot

číslo sady labor. vzorku	vzdálenost švu od čelisti [mm]	$A_{def}^R [J]$	$F_{max}^R [N]$	$I^R [Ns]$
1	100	2,952	152,519	0,881
2	200	3,064	152,706	0,899
3	300	3,092	149,399	0,842
4	500	2,868	129,725	0,860
5	700	3,092	150,889	0,875
6	800	2,840	125,089	0,823
7	900	2,812	135,195	0,804

Pro vizualizaci naměřených dat a závislosti uvedených charakteristik na vzdálenosti švu od čelisti zkušebního přístroje byl využit graf 4.1.

Graf 4.1: Závislost deformační práce, maximální rázové síly a impulzu síly na poloze švu (na vzdálenosti švu od čelisti zkušebního přístroje)



Na základě prvotního zpracování naměřených hodnot a výše uvedených výsledků experimentálního měření lze vyslovit hypotézu, že hodnoty spotřebované deformační práce, maximální síly ani impulzu rázové síly nezávisí na vzdálenosti švu od čelistí (neboť ze zvoleného postupu získávání dat vyplývá, že o závislost sledovaných charakteristik na poloze švu nejde, pokud je regresní přímka rovnoběžná s osou x).

Předpoklad nezávislosti sledovaných charakteristik na poloze švu je možné posoudit pomocí regresní analýzy a následného testování získaných parametrů. Regresní analýzou (MNČ) vytvoříme lineární model – proložíme hodnoty regresní přímkou $f(x)=a+bx$. V případě nezávislosti sledovaných charakteristik by měl být regresní koeficient b roven nule, hodnota měřené charakteristiky bude kolísat kolem své střední hodnoty μ , která by mohla být rovna parametru a . Oba předpoklady lze ověřit vhodným statistickým testem.

Ověření nulové hodnoty regresního koeficientu b (např.: dle [30]):

$H_0: b_0 = 0$

$H_1: b_0 \neq 0$

Testové kritérium:

$$t = \frac{b}{\frac{s_y}{s_x} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (4.177)$$

kde: b ... regresní koeficient (vypočtený z regrese)

s_x ... směrodatná odchylka hodnot x

s_y ... směrodatná odchylka hodnot y

r ... koeficient korelace hodnot x a y

n ... počet hodnot

Hladina významnosti : $\alpha = 0,05$

Kritický obor:

$$\begin{aligned} |t| &\geq t_{1-\alpha/2}(n-2) \\ |t| &\geq 2,5706 \end{aligned} \quad (4.178)$$

Tabulka 4.11: Výsledky testu ověření regresního koeficientu b

	$A_{def}^R [J]$	$F_{max}^R [N]$	$I^R [Ns]$
b	-0,0002	-3E-05	-8E-05
s_x	0,3109	0,3109	0,3109
s_y	0,1228	11,8439	0,0337
r	-0,5378	-0,6751	-0,7467
t	-0,0013	-2,4E-06	-0,0025

Ověření hodnoty parametru a (např.: dle [31]):

$H_0: \mu = a$

$H_1: \mu < a$

Testové kritérium:

$$t = \frac{\bar{x} - a}{s} \sqrt{n} \quad (4.179)$$

kde: a ... regresní parametr (vypočtený z regrese)
 \bar{x} ... odhad střední hodnoty naměřených hodnot ($A_{def}^R, F_{max}^R, I^R$)
 s ... směrodatná odchylka naměřených hodnot ($A_{def}^R, F_{max}^R, I^R$)
 n ... počet hodnot

Hladina významnosti : $\alpha = 0,05$

Kritický obor:

$$\begin{aligned} t &\leq t_{\alpha}(n-1) \\ t &\leq -1,9432 \end{aligned} \quad (4.180)$$

Tabulka 4.12: Výsledky testu ověření parametru a

	$A_{def}^R [J]$	$F_{max}^R [N]$	$I^R [Ns]$
\bar{x}	2,9600	142,2174	0,8549
a	3,0662	155,0810	0,8954
s	0,1228	11,8439	0,0337
t	-2,2879	-2,8735	-3,1791

Výsledky prvního testu (tab. 4.11) podporují původní předpoklad o nezávislosti sledovaných charakteristik na poloze švu na hladině významnosti $\alpha=0,05$ – na základě naměřených hodnot nelze zamítnout hypotézu, že koeficient b je roven nule.

Výsledky druhého testu vedou k zamítnutí předpokladu, že střední hodnota sledovaných charakteristik je rovna regresnímu parametru a , na hladině významnosti $\alpha=0,05$ lze přijmout alternativní hypotézu, která předpokládá, že skutečná střední hodnota je nižší než vypočtená na základě získaných dat.

4.2.3.3 Experimentální analýza deformace rázově namáhaného vzorku

Analýza je provedena prostřednictvím konfrontace deformace při rázovém a quasistatickém namáhání, která byla sledována na vzorcích stejných konfigurací stehu a švu s různou rychlostí změny působící síly (specifikace vzorků viz příloha 10).

Cílem experimentální analýzy bylo ověřit předpoklad, že se materiál při dynamickém namáhání deformuje méně než při quasistatickém namáhání a projevuje se jako křehký – k destrukci spoje dochází při nižším protažení. Pro tuto část analýzy deformace rázově namáhaného vzorku je určující geometrický stav vzorku těsně před přetržením.

Dále byl vyhodnocen průběh deformace vytypovaných vzorků a porovnán s průběhem deformace stejných vzorků při quasistatickém namáhání.

a) Vyhodnocení poměrného prodloužení při rázovém a quasistatickém namáhání

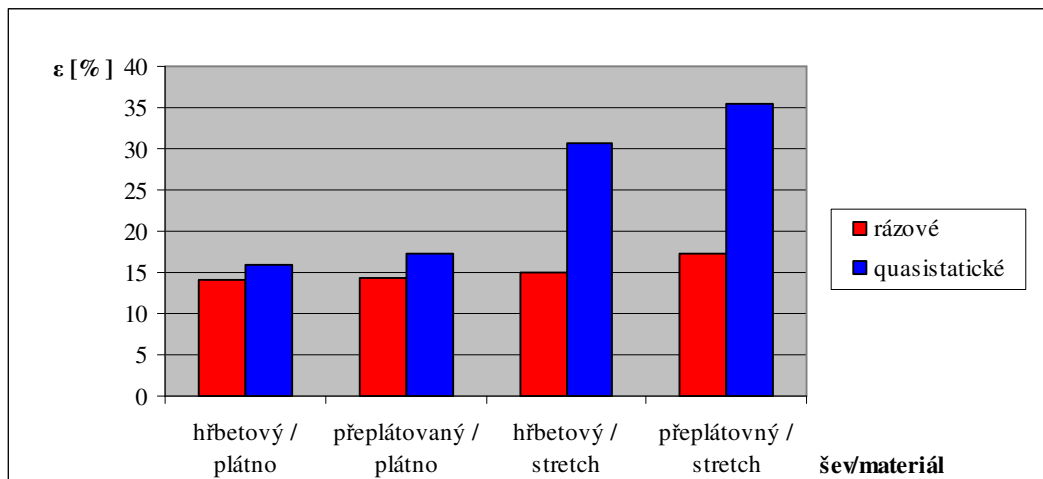
Stanovení poměrného prodloužení vychází pro quasistatické namáhání z ČSN EN ISO 13935-1 (s upravenou délkou a šířkou vzorku), pro rázové namáhání z metody uvedené v kap. 4.2.2.2 a z postupu uvedeném v 4.2.2.3.

Výsledky průměrných vypočtených hodnot poměrného prodloužení jsou uvedeny v tabulce 4.13 (kompletní výsledky měření viz příloha 10). Dále bylo využito grafického znázornění číselných údajů pro přehlednější vyjádření rozdílů poměrného prodloužení (graf 4.2).

Tabulka 4.13: Průměrné hodnoty poměrného prodloužení při přetrhu vzorku při rázovém a quasistatickém namáhání

materiál	plátno				stretch			
šev	1.01.01		2.01.01		1.01.01		2.01.01	
č. lab. vz	1		2		3		4	
	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]
průměrná hodnota	15,868	14,148	17,172	14,286	30,718	15,042	35,344	17,246

Graf 4.2: Porovnání poměrného prodloužení při přetrhu vzorku při rázovém a quasistatickém namáhání



Bylo ověřeno, že při rázovém namáhání* textilie dochází k menší deformaci vzorku než při quasistatickém namáhání. Výraznější rozdíl se projevil u materiálu, který za quasistatických podmínek vykazoval vyšší deformaci. U tohoto materiálu došlo při rázovém působení síly k vzrůstu napětí tak rychle, že se nestačil deformovat a šev se trhal při nižším protažení.

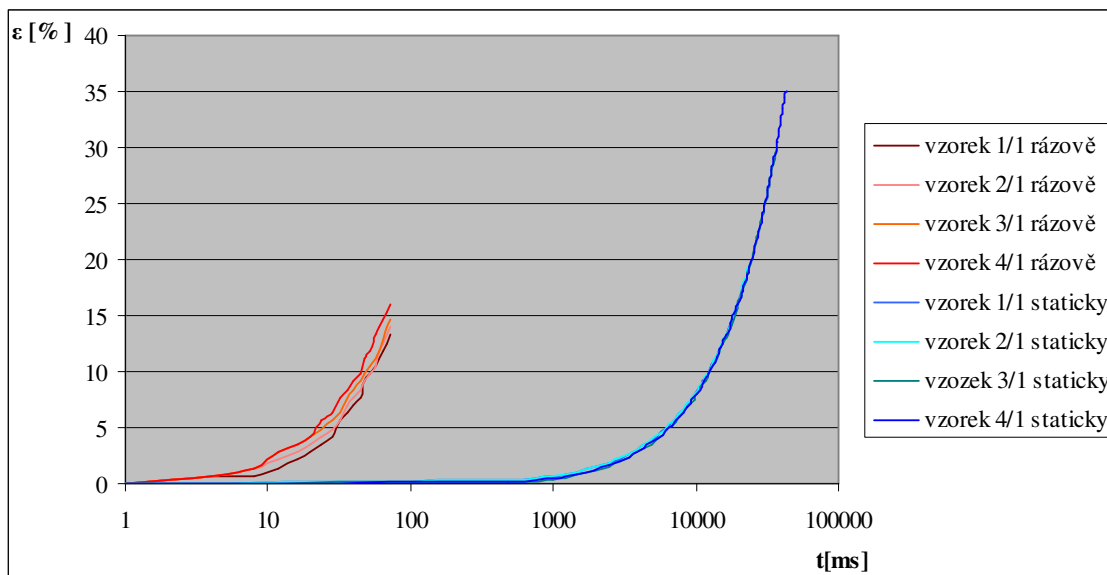
Vzorky s přeplátovanými švy vykazovaly vyšší deformaci při quasistatickém i rázovém namáhání než s hřbetovými švy. Výraznější rozdíl mezi deformací vzorků se projevil opět u materiálu s vyšší deformací.

b) Sledování průběhu deformace

V průběhu zkoušky při quasistatickém namáhání a při rázovém namáhání byly v krátkých časových intervalech zaznamenávány hodnoty působící síly a hodnoty absolutního prodloužení vzorku (při quasistatickém namáhání) nebo hodnoty úhlu překyvu (při rázovém namáhání). Z naměřených hodnot byly vypočítány hodnoty poměrného prodloužení při quasistatickém a rázovém namáhání, které byly použity pro grafické znázornění závislosti poměrného prodloužení na čase (tabulky hodnot a odpovídající grafy viz příloha 10, porovnání těchto závislostí pro oba způsoby namáhání viz graf 4.3). Dále byla vyjádřena závislost působící síly na čase (tabulky hodnot a odpovídající grafy viz příloha 10, porovnání těchto závislostí pro oba způsoby namáhání viz graf 4.4).

Vyloučením časové osy byly získány podklady pro grafické znázornění závislosti poměrného prodloužení na působící síle (tabulky hodnot a odpovídající grafy viz příloha 10, porovnání těchto závislostí pro oba způsoby namáhání viz graf 4.5).

Graf 4.3: Porovnání závislosti poměrného prodloužení na čase při quasistatickém a rázovém namáhání

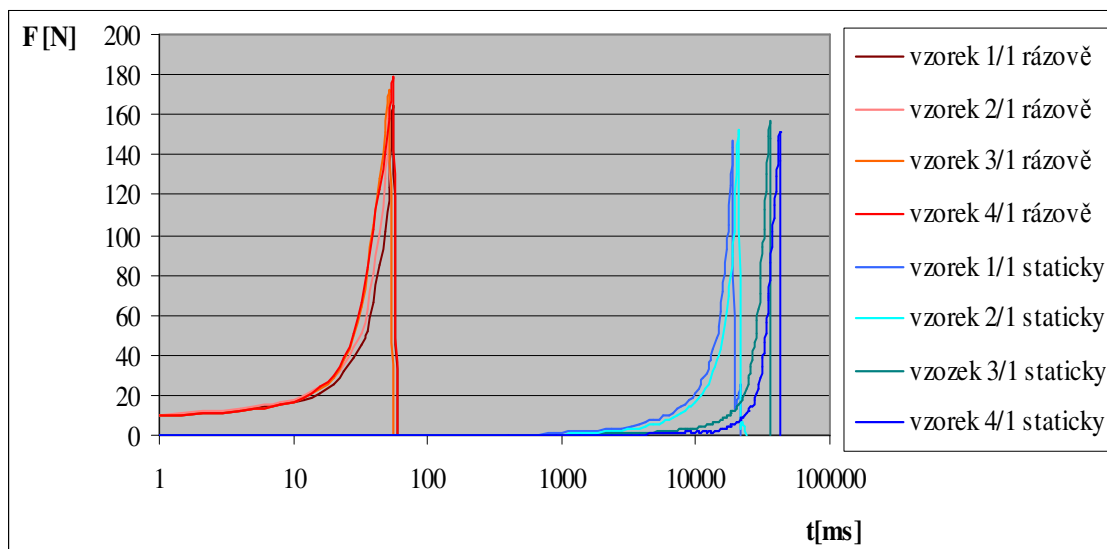


* Je nutno vzít v úvahu, že odečítání úhlu překyvu při přetrhu vzorku při rázovém namáhání (z něhož se vychází pro výpočet poměrného prodloužení) je prováděno opticky ze záznamu zkoušky. Lidské oko zaznamená „přetrh“ ve chvíli oddálení částí vzorku, nikoli ve chvíli přetrhu nitě a poklesu síly. Z tohoto důvodu budou reálné hodnoty úhlu překyvu při přetrhu nižší než naměřené a také vypočtená deformace bude ještě o něco nižší.

Z grafu je zřetelné, že deformace při rázovém namáhání je nejen výrazně nižší, ale také probíhala během výrazně kratší doby (proto bylo vzhledem k velkým rozdílům na časové ose využito logaritmického měřítka).

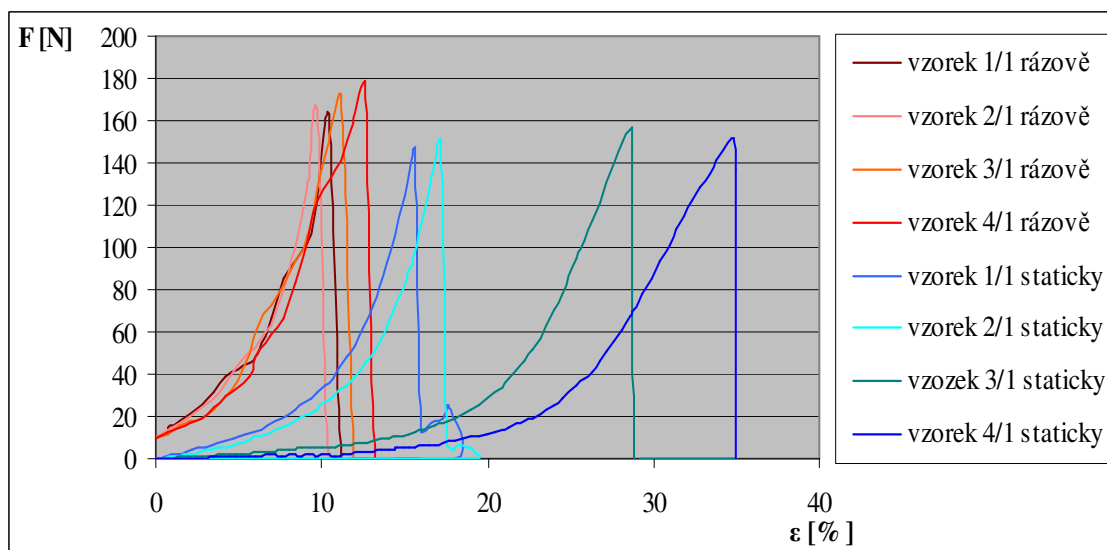
Závislost prodloužení na čase je při quasistatickém namáhání lineární, neboť zkouška dle normované metody probíhá za konstantního přírůstku prodloužení. Také závislost prodloužení na čase při rázovém namáhání vykazuje lineární tendenci (viz graf P10.1 v příloze 10).

Graf 4.4: Porovnání závislosti působící síly na čase při quasistatickém a rázovém namáhání



Z grafu je patrné, že velikost maximální síly při rázovém namáhání použitých vzorků je o něco vyšší, ale především dojde k destrukci během výrazně kratší doby (proto bylo opět využito logaritmického měřítka na časové ose).

Graf 4.5: Porovnání závislosti působící síly na prodloužení při quasistatickém a rázovém namáhání



Z grafu je zřejmé, že průběh závislosti síly na protažení je pro rázové a quasistatické namáhání zcela odlišný. Pro vzorky z vysoko roztahných materiálů je deformace v quasistatickém režimu velmi výrazná, v rázovém režimu je však srovnatelná pro vzorky z různých materiálů. Také průběh sledované závislosti je v rázovém režimu srovnatelný pro všechny použité vzorky, v quasistatickém režimu je průběh sledované závislosti rozdílný v závislosti na tažnosti použitého materiálu.

5. ZÁVĚR

Práce přináší nové aktuální poznatky o mechanicko-fyzikálních vlastnostech spojů prospěšné především v oblasti výroby, testování a používání technických konfekcí.

Aktuálnost práce vyplývá z vysokých nároků na kvalitu výrobků technických konfekcí a to především nároků na pevnost spojů, jako jednu z nejdůležitějších vlastností spojů. Vysoké náklady na zkoušení již hotových výrobků vedou k potřebě řešit možnost stanovení pevnosti teoreticky či testováním vhodných vzorků na vhodném přístroji.

Výsledky získané touto prací budou z pohledu praktického využití přínosem.

Shrnutí výsledků práce:

- byly definovány hlavní mechanicko-fyzikální vlastnosti spojů – příčná pevnost a podélná tažnost – jako nejdůležitější funkční vlastnosti (práce též upozorňuje na rozdílnost vlastností a priority určování v závislosti na šitém materiálu)
- byla provedena teoretická analýza determinačních faktorů
 - byla provedena detailně, s ohledem na způsob vytváření spojů a především na způsob namáhání spojů při užívání výrobků
 - vliv způsobu namáhání je zohledněn ve dvou rovinách: vliv směru namáhání vůči struktuře a vliv rychlosti změny velikosti působících sil
 - předkládá ucelené informace o objektivních příčinách vlivu determinačních faktorů na výslednou pevnost švu
 - vysvětluje jednotlivé ovlivňující faktory, jakož i jejich interakce
 - umožňuje najít východiska a stanovit podstatné argumenty predikční funkce pro předvídání pevnosti švu, vede k zavedení koeficientu švu jako vstupního parametru pro predikci pevnosti spoje
 - odhaluje důležitost testování, speciálně potřebu testování v různých podmínkách působení akčních sil, zvláště pak dynamicky působících
 - ve svém důsledku umožní sladit parametry spoje, použitý šitý materiál, nitě, techniku a technologii zpracování
- byl předložen matematický model pro predikci pevnosti šitého spoje při quasistatickém namáhání jako funkční závislost reálně existujících proměnných
- byly experimentálně verifikovány koeficienty švu pro vybrané typy švů
- na základě doplňkového měření pevnosti nití v kliče a pevnosti nití po šití byly stanoveny orientační koeficienty
- byly experimentálně ověřeny změny mechanických charakteristik při změnách dílčích determinačních faktorů
- byla provedena aplikace algoritmu výpočtu modulů plošné napjatosti na oblasti švů, která ověřila jeho vhodnost k praktickému využití při jednoosém namáhání švů
- poprvé byly stanoveny moduly plošné napjatosti švu, umožňující charakterizovat odolnost švu vůči namáhání; byly konfrontovány moduly pro vytypované zástupce švů

- byly vymezeny teoretické podklady pro objasňování šíření rázu v nitích a plošných textiliích
- byl navržen a zkonstruován prototyp přístroje pro testování rázové pevnosti textilií a jejich švů imitující dynamické namáhání; umožňuje sledování dynamických charakteristik – deformační práce, maximální rázové síly i impulzu síly, event. relativního prodloužení
- byla vypracována metoda zkoušení rázové pevnosti švů, vhodná pro sledování pevnostních charakteristik švů v podmínkách dynamického namáhání
- byla provedena experimentální analýza součinitele dynamického působení z hlediska vlivu vstupních parametrů technologického vypracování spoje
- byla provedena experimentální analýza dynamických charakteristik švu – rázové pevnosti jako maximální rázové síly, impulzu síly a deformační práce – s cílem ověřit vliv polohy švu na výslednou pevnost
- byla provedena experimentální analýza deformace rázově namáhaného vzorku se švem – byla vyhodnocena maximální poměrná deformace a průběh deformace při rázovém působení síly, výsledky byly konfrontovány s deformací stejně provedených vzorků při quasistatickém namáhání

Přínos práce:

- pro vědní obor:
 - přínos v oblasti pedagogické jako podpora teorie tvorby stehů, švů a konfekcionování technických textilií – práce rozšířila poznatky týkající se vlastností spojů a jejich testování a položila základy pro další výzkumné řešení, které má připravit podmínky pro projektování spojů především technických konfekcí
 - teoretická analýza hraje důležitou roli při formulaci výsledného matematického modelu pro teoretickou predikci pevnosti
 - zavedením koeficientu švu lze teoreticky stanovit jeho skutečnou pevnost, která se stává významným kritériem pro projektování struktury spojů
 - prototyp přístroje pro testování rázové pevnosti textilií umožňuje experimentálně stanovit dynamické charakteristiky švu
- pro praxi:
 - přínos především pro zpracovatele technických textilií a výrobce technických konfekcí
 - poznatky analýzy determinačních faktorů mají zásadní význam při projektování spojů a umožňují stanovení optimální technologie jejich hotovení
 - predikční funkce pro teoretické stanovení pevnosti švu umožní nejen prognózu pevnosti, ale i spolehlivosti a zabezpečení funkčnosti spojů (vztah může být lehce využit)
 - výsledky experimentálních měření nachází uplatnění při stanovení pevnosti švu teoreticky, umožní předvídat chování spojů a snížit vysoké náklady na testování již hotových výrobků

- realizace měřicího přístroje umožňuje ověřování rázové pevnosti; uplatní se v praxi výzkumu i výroby pro laboratorní testování; bude přínosem pro projektování konstrukce spojů namáhaných rázově

Předmět dalšího vývoje:

- Práce je syntézou současného stavu znalostí dané problematiky, ze které lze vycházet při dalším výzkumu v této oblasti.
- Složitost mechanického působení na komponenty spoje způsobuje, že model pro predikci quasistatické příčné pevnosti není univerzální, respektive není dostatečně přesný pro všechny spoje. Do pevnosti se promítá mnoho různorodých vlivů, které by bylo vhodné podrobněji analyzovat. Například se zabývat možnostmi teoretického stanovení pevnosti překládaných švů, kde na pevnost mají vliv i další faktory (míra sevření vrstev, tření mezi vrstvami apod.)
- Dále je třeba rozvíjet podmínky experimentálního ověřování rázové pevnosti švů, zdokonalit přístroj z hlediska ovladatelnosti, bezpečnosti a softwaru – řešit možnosti usnadnění vyhodnocování zkoušek, testování větších vzorků, návazně na požadavky technologie výroby technických konfekcí.
- Stávající normované zkušební metody pro experimentální stanovení pevnosti švu nepostihují problematiku vlivu způsobu namáhání ani z hlediska rychlosti změny velikosti síly ani z hlediska konečného efektu směru působící síly – na základě těchto skutečností je třeba hledat cesty k vytvoření normovaných metod měření.
- Náročný úkol představuje potřeba odhalit hlubší zákonitosti dynamických vlastností spojů a stanovit teoretické závislosti definující vlastnosti rázově namáhaných spojů – fyzikální podstata je příliš složitá, není přesně známá a popsána ani pro izotropní elastické materiály jednoduchých tvarů.

6. SEZNAM LITERATURY

- [1] KUNZ, O. Konfektionování technických textilií. *Problematika konfektionování technických textilií*. KKV Prostějov, 2001.
- [2] HANUŠ, J. Oblasti využití technických textilií. *Problematika konfektionování technických textilií*. KKV Prostějov, 2001.
- [3] PILLER, B.; LEVINSKÝ, O. *Malá encyklopedie textilních materiálů*. SNTL Praha, 1982.
- [4] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna*. TU v Liberci, 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [5] KUNZ, O. Speciální technologie výroby ochranných oděvů. *Ochranné oděvy II*. KKV Prostějov, 2002.
- [6] *Encyklopedia techniki*. Wydawnictwa naukowo-techniczne Warszawa, 1986. ISBN 83-204-0574-2.
- [7] *Norma ISO 4916:1982. Textiles; Seam types, Classification and terminology*, International Organization for Standardization, 1982.
- [8] *Norma ČSN ISO 4915:1991. Textilie; Druhy stehů, třídění a terminologie*, Český normalizační institut, 1993.
- [9] Červjakov, F., I.; Nikolaenko, A., A. *Švejnye mašiny*. Izdatel'stvo Mašinostroenie Moskva, 1976.
- [10] Sindel, R. *Nähgarne für extrem belasteten Nähte*. AMANN, 1998.
- [11] Nahtquerfestigkeiten. *Die Naht – Nähtechnische Informationen von Gütermann*, 1986, Nr. 86, s. 6
- [12] KOŠKOVÁ, B.; KOŠEK, M. *Struktura a vlastnosti vláken*, VŠST Liberec, 1991.
- [13] STANĚK, J. *Nauka o textilních materiálech*, díl I, část 4, Vlastnosti délkových a plošných textilií. VŠST Liberec, 1988.
- [14] KUNZ, O. K problematice vlastností švů ve vztahu k vlastnostem šitého materiálu. *Informativní přehled*. VÚP Brno, 1979, č.1, s. 41
- [15] STRÍŽ, B. *Mechanika textilií*, Část 1: Základy mechaniky kontinua, TU v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-458-7.

- [16] STŘÍŽ, B. *Mechanika textilií*, Část 2: Aplikace mechaniky kontinua, TU v Liberci, 2003. ISBN 80-7083-692-X.
- [17] *Norma ČSN EN ISO 13935-1. Textilie, tahové vlastnosti švů plošných textilií a konfekčních výrobků – Část 1: Zjišťování maximální síly do přetrhu švu metodou Strib.* Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [18] *Norma ČSN EN ISO 13935-2. Textilie, tahové vlastnosti švů plošných textilií a konfekčních výrobků – Část 2: Zjišťování maximální síly do přetrhu švu metodou Grab.* Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [19] *Technický normalizační příkaz TSO-C23d. Požadavky na osobní padákové komplety a jejich součásti.* Státní letecká inspekce, Praha, 1994.
- [20] *Norma DIN EN ISO 179-1. Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung.* Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1997.
- [21] *Norma DIN EN ISO 179-2. Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 2: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung.* Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1997
- [22] *Norma DIN EN ISO 13802, Kunststoffe – Verifizierung von Pendelschlagwerken – Charpy-, Izod- und Schlagzugversuch.* Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1997
- [23] *Norma ČSN 80 0893. Zkoušení textilních lan. Zkouška rázové odolnosti.* Český normalizační institut, Praha, 1990
- [24] BEGLAROVNA, K., G. *Issledovanie kinetiki razrušenija švejnych nitok*, Disertační práce, Moskovskaja gosudarstvennaja akademija legkoj promyšlennosti, Moskva 1993
- [25] PECH, J. *Dynamischen Belastung der Fäden beim Nähen.* AMANN, 1998
- [26] BAJER, J. *Mechanika 2.* UP v Olomouci, 2004. ISBN 80-244-0884-8.
- [27] PETERKA, F. *Úvod do kmitání mechanických soustav s vnitřními rázy.* Academia Praha, 1981.
- [28] BREPTA, R. *Rázy a vlny napětí v pevných a elastických tělesech.* ČVUT Praha, 1977.
- [29] BREPTA, R. *Vlny napětí a rázové jevy v lineárně elastických a viskoelastických prostředích*, TU v Liberci, 1997. ISBN 80-7083-228-2.

- [30] KARPÍŠEK, Z.; DRDLA, M. *Applied statistics*, text book, VUT Brno, 2007.
- [31] ANDĚL, J. *Matematická statistika*. SNTL Praha, 1978.
- [32] SOBOTKA, Z. *Reologie hmot a konstrukcí*, Academia Praha, 1981.
- [33] LENĎÁKOVÁ, K. *Studie namáhání textilie a švů u vysokoroztažných textilií jako anizotropních materiálů*. Bakalářská práce 346/06, Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [34] VACULOVÁ, A. *Analýza pevnosti kevlarových a nomexových nití v kličce*. Bakalářská práce 396/07, Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [35] MACHÁŇOVÁ, L. *Analýza vlivu poškození šicí nitě při šití na pevnost spoje technických textilií*. Bakalářská práce 285/04, Technická univerzita v Liberci, 2004
- [36] VESELÁ, J. *Analýza závislosti mechanických vlastností vzorku textilie a švu na způsobu upnutí do čelistí dynamometru*. Bakalářská práce 425/08, Technická univerzita v Liberci, 2008

7. SEZNAM PUBLIKACÍ

- [1] DOSEDĚLOVÁ, I. *Problematika technických konfekcí, charakteristiky spojů a jejich vlastností*, písemná práce ke zkoušce DS, TU v Liberci, 2004
- [2] DOSEDĚLOVÁ, I. Strength of the sewn seam – the prediction function, the influential factor. In *Structure and Structural Mechanics of Textile Fabric*. Technical University in Liberec, 2005. ISBN 80-7372-002-7.
- [3] DOSEDĚLOVÁ, I. Strength of the sewn seam in dependence on the method of strain, In *Structure and Structural Mechanics of Textile Fabric*. Technical University in Liberec, 2006. ISBN 80-7372-135-X.
- [4] DOSEDĚLOVÁ, I. Theoretical and experimental method for determination of sewn seam strength, In *6th TEXTILE SCIENCE*. Technical University in Liberec, 2007. ISBN 978-80-7372-207-4.
- [5] DOSEDĚLOVÁ, I. *Manuál pro použití laboratorního přístroje CHK/RMI16000*, TU v Liberci, 2008
- [6] DOSEDĚLOVÁ, I. *Analýza vlastností spojů technických konfekcí s ohledem na způsob zatěžování*, písemná práce ke SDZ, TU v Liberci, 2008
- [7] DOSEDĚLOVÁ, I. *Technical textiles processing*, výukové materiály pro kurz specialistů z JAR, TU v Liberci, 2009
- [8] DOSEDĚLOVÁ, I. Impact strength of sewn seam in dependence on seam location in product, In *Structure and Structural Mechanics of Textile Fabric*. Technical University in Liberec, 2009. ISBN 978-80-7372-542-6
- [9] DOSEDĚLOVÁ, I. Determination of sewn seam impact strength, In. *9th International Scientific Conference New Trends in Technical Systems Operation*. Technical University in Košice, 2009. ISBN 978-80-553-0312-3.
- [10] DOSEDĚLOVÁ, I. Determination of sewn seam impact strength. In *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, Scientific supplement of Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Romania, Fascicule 4, 2009. ISSN: 1584-2665 [print], ISSN: 1584-2673 [CD-Rom].

8. SEZNAM ZKRATEK

A_{def}	deformační práce
b	šířka vzorku
c	fázová rychlost příčných vln v jednorozměrném kontinuu
c_0	fázová rychlost podélných vln v jednorozměrném kontinuu
c_1	fázová rychlost podélných vln v trojrozměrném kontinuu
c_2	fázová rychlost příčných vln v trojrozměrném kontinuu
c_3	fázová rychlost podélných vln v dvojrozměrném kontinuu
C_d	součinitel dynamického působení
E	modul pružnosti v tahu
F	síla
F_n	pevnost nitě
F_{nk}	pevnost nitě v kliče
F_{nkp}	poměrná pevnost nitě v kliče
F_{no}	pevnost nitě po opotřebení
$F_{nš}$	poměrná pevnost nitě po šití
F^R	rázová pevnost
$F_{\text{š}}$	pevnost švu
$F_{\text{š}(t)}$	teoretická pevnost švu
F_t	pevnost textilie
G	modul pružnosti ve smyku
h	hustota stehu
η	součinitel vazkosti
I^R	impulz síly
l_k	délka kličky pro protažení zásoby spodní nitě
l_{ns}	délka nitě ve stehu
l_s	délka stehu
MNČ	metoda nejmenších čtverců
n	počet vazných bodů

∇^2	Laplaceův operátor
p	počet průchodů nitě ouškem jehly
PES	polyester
t	tloušťka spojovaných vrstev
t	čas
U	stupeň účinnosti švu
u	výchylka hmotného bodu ve směru postupu vlny
w	výchylka hmotného bodu kolmo na směr postupu vlny
x	polohová souřadnice
Z	ztráta pevnosti nitě na jeden vazný bod
Z_c	celková ztráta pevnosti nitě po zašití do spoje
α	koeficient švu
Δl	absolutní prodloužení
ε	poměrné prodloužení
$\varepsilon_{\text{šp}}$	maximální podélná deformace švu při poruše
λ	Laméova konstanta
μ	Poissonovo číslo
ρ	hustota prostředí
σ	normálové napětí
τ	smykové napětí
φ	koeficient pevnosti nitě v kličce
ψ	koeficient poškození nitě

9. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Seznam obrázků:

Obrázek 2.1:	Logo výstavy TECHTEXTIL	15 -
Obrázek 2.2:	Schematické znázornění užité hodnoty výrobku	16 -
Obrázek 2.3:	Schematické znázornění namáhání švu	17 -
Obrázek 2.4:	Posuv nití ve švu	19 -
Obrázek 2.5:	Grafické znázornění vazného bodu	20 -
Obrázek 2.6:	Schematické znázornění vztahů D-N-J	21 -
Obrázek 2.7:	Struktura švu 1.01.01	22 -
Obrázek 2.8:	Struktura švu 2.04.04	22 -
Obrázek 2.9:	Základní struktura stehu 301	23 -
Obrázek 2.10:	Základní struktura stehu 401	23 -
Obrázek 2.11:	Struktura stehu dvounitého vázaného v závislosti na napětí niti	24 -
Obrázek 2.12:	Struktura stehu dvounitého vázaného v závislosti na spolupráci stehotvorných orgánů	25 -
Obrázek 2.13:	Struktura stehu dvounitého řetízkového v závislosti na napětí niti ..	25 -
Obrázek 2.14:	Schematické znázornění délky stehu	26 -
Obrázek 2.15:	Schematické znázornění šířky stehu	26 -
Obrázek 2.16:	Šířka švové záložky	28 -
Obrázek 3.1:	Grafické vyjádření tahového namáhání	30 -
Obrázek 3.2:	Tahové křivky příčného namáhání (vzorový příklad)	31 -
Obrázek 3.3:	Tahové křivky podélného namáhání (vzorový příklad)	32 -
Obrázek 3.4:	Schematické znázornění namáhání niti v kliče	34 -
Obrázek 3.5:	Schematické znázornění namáhání hřbetových švů	36 -
Obrázek 3.6:	Schematické znázornění namáhání přeplátovaných švů	37 -
Obrázek 3.7:	Rozdíl větvení síly do stehových řádků u dvouřádkových švů	37 -
Obrázek 3.8:	Umístění vazných bodů u stehů 301 a 401	38 -
Obrázek 3.9:	Způsoby provedení švu 2.04.03	40 -
Obrázek 3.10:	Grafické znázornění prodloužení stehů	40 -
Obrázek 3.11:	Schematické znázornění změny tahové křivky niti v závislosti na rychlosti změny působící síly	43 -
Obrázek 3.12:	Schematické znázornění změny síly při namáhání quasistatickým a rázovým	43 -
Obrázek 4.1:	Schematické znázornění namáhání švu v příčném směru	45 -
Obrázek 4.2:	Označení os	49 -
Obrázek 4.3:	Deformace segmentu experimentálního vzorku	50 -
Obrázek 4.4:	Geometrie segmentu experimentálního vzorku	54 -
Obrázek 4.5:	Silové poměry na segmentu	54 -
Obrázek 4.6:	Silové poměry na elementech rovnoběžných s okraji vzorku	55 -
Obrázek 4.7:	Laboratorní vzorek pro příčné namáhání	60 -
Obrázek 4.8:	Zkušební vzorek pro zkoušku metodou Strib	60 -
Obrázek 4.9:	Zkušební vzorek pro zkoušku metodou Grab	61 -
Obrázek 4.10:	Laboratorní vzorek pro podélné namáhání	61 -
Obrázek 4.11:	Zkušební vzorek pro zkoušku podélné tažnosti	61 -
Obrázek 4.12:	Obraz zatěžovaného švu	66 -
Obrázek 4.13:	Schematické znázornění vzájemného působení těles při rázu	73 -
Obrázek 4.14:	Schematické znázornění vektoru posuvu	81 -
Obrázek 4.15:	Schematické znázornění odrazu a lomu vln	89 -

Obrázek 4.16: Schematické znázornění pružné hmoty	- 93 -
Obrázek 4.17: Schematické znázornění vazké kapaliny	- 93 -
Obrázek 4.18: Schematické znázornění Kelvin-Voigtova modelu	- 94 -
Obrázek 4.19: Schematické znázornění podélného rázu nití.....	- 95 -
Obrázek 4.20: Schematické znázornění podélného rázu textilního pásu	- 97 -
Obrázek 4.21: Idealizovaný případ šíření rozruchu v textilním pásu.....	- 98 -
Obrázek 4.22: Schéma laboratorního přístroje pro měření rázové pevnosti	- 101 -
Obrázek 4.23: Upínací čelisti	- 102 -
Obrázek 4.24: Schéma elektronické měřicí soustavy.....	- 103 -
Obrázek 4.25: Schematické znázornění ovládacího panelu řídicí jednotky.....	- 104 -
Obrázek 4.26: Zobrazení maximální hodnoty síly a závislosti působící síly na čase v aplikačním programu	- 106 -
Obrázek 4.27: Okno otevřené příkazem uložit data.....	- 106 -
Obrázek 4.28: Výstupní tabulka hodnot z jednoho měření	- 107 -
Obrázek 4.29: Výstupní diagram z jednoho měření.....	- 107 -
Obrázek 4.30: Laboratorní vzorek pro rázovou zkoušku	- 109 -
Obrázek 4.31: Zkušební vzorek pro rázovou zkoušku	- 109 -
Obrázek 4.32: Geometrie vypnutého vzorku v okamžiku přetrhu	- 113 -
Obrázek P1.1: Zkušební přístroj PROMI PC 3000.....	- 139 -
Obrázek P1.2: Schematické znázornění provedení hřbetového švu	- 140 -
Obrázek P2.1: Schematické znázornění provedení hřbetových švů	- 144 -
Obrázek P2.2: Schematické znázornění jednoduchých přeplátovaných švů	- 144 -
Obrázek P2.3: Schematické znázornění zakládaných přeplátovaných švů.....	- 145 -
Obrázek P4.1: Schematické znázornění použitých švů	- 153 -
Obrázek P5.1: Schematické znázornění provedení vybraných zástupců švů.....	- 157 -
Obrázek P5.2: Laboratorní vzorek připravený pro příčné namáhání.....	- 158 -
Obrázek P5.3: Laboratorní vzorek připravený pro podélné namáhání	- 158 -
Obrázek P5.4: Zkušební vzorek upravený pro příčné namáhání	- 158 -
Obrázek P5.5: Zkušební vzorek upravený pro podélné namáhání.....	- 158 -
Obrázek P5.6: Laboratorní vzorek bez švů.....	- 159 -
Obrázek P5.7: Umístění šablony a zakreslení bodů – vrcholů segmentů – na vzorky pro příčné namáhání	- 159 -
Obrázek P5.8: Umístění šablony a zakreslení bodů – vrcholů segmentů – na vzorky pro podélné namáhání	- 159 -
Obrázek P5.9: Obrazový záznam průběhu zkoušky (příklad příčného namáhání).- 160 -	- 160 -
Obrázek P8.1: Schematické znázornění použitého hřbetového švu	- 172 -
Obrázek P8.2: Schematické znázornění použitých přeplátovaných švů.....	- 173 -
Obrázek P8.3: Schematické znázornění použitých zakládaných švů	- 173 -

Seznam tabulek:

Tabulka 2.1: Příklady výrobků namáhaných v závislosti na směru působících sil..	- 17 -
Tabulka 2.2: Příklady výrobků namáhaných v závislosti na rychlosti změny působících sil	- 18 -
Tabulka 3.1: Doporučené hodnoty pro pevnost polyesterových nití po šití.....	- 35 -
Tabulka 4.1: Parametry měření pevnosti a roztažnosti švu.....	- 61 -
Tabulka 4.2: Výsledky průměrných naměřených hodnot příčné pevnosti spojů a odpovídajících koeficientů švu α	- 64 -

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů	- 68 -
Tabulka 4.4: Vypočtené hodnoty rozdílů souřadnic vrcholů segmentů.....	- 69 -
Tabulka 4.5: Vypočtené hodnoty složek materiálového gradientu posuvu	- 69 -
Tabulka 4.6: Vypočtené hodnoty složek materiálového gradientu posuvu pro jednoosou napjatost.....	- 70 -
Tabulka 4.7: Vypočtené hodnoty modulů dle varianty 1	- 70 -
Tabulka 4.8: Vypočtené hodnoty modulů dle varianty 2	- 70 -
Tabulka 4.9: Hodnota součinitelů dynamického působení v závislosti na druhu švu.....	- 116 -
Tabulka 4.10: Průměrné hodnoty z naměřených a vypočtených hodnot	- 118 -
Tabulka 4.11: Výsledky testu ověření regresního koeficientu b	- 119 -
Tabulka 4.12: Výsledky testu ověření parametru a	- 120 -
Tabulka 4.13: Průměrné hodnoty poměrného prodloužení při přetrhu vzorku při rázovém a quasistatickém namáhání.....	- 121 -
Tabulka P1.1: Naměřené hodnoty příčné pevnosti	- 142 -
Tabulka P2.1: Jednořádkové švy s odlišným druhem švu	- 146 -
Tabulka P2.2: Jednořádkové švy s odlišným druhem stehu	- 146 -
Tabulka P2.3: Víceřádkové jednoduché přeplátované švy	- 147 -
Tabulka P2.4: Dvouřádkové švy s odlišným druhem švu.....	- 147 -
Tabulka P2.5: Dvouřádkové přeplátované švy s odlišnou vzdáleností stehových řádků	- 148 -
Tabulka P2.6: Vypočtené průměrné hodnoty příčné pevnosti švů F_s a koeficientů α	- 148 -
Tabulka P3.1: Specifikace použitých šicích nití	- 150 -
Tabulka P3.2: Průměrné hodnoty absolutních pevností v lineárním stavu a v kličce	- 151 -
Tabulka P4.1: Naměřené hodnoty pevnosti nitě před šitím	- 154 -
Tabulka P4.2: Průměrné hodnoty pevnosti nitě po šití	- 154 -
Tabulka P4.3: Vypočtené hodnoty koeficientu po opotřebení.....	- 155 -
Tabulka P5.1: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 1	- 161 -
Tabulka P5.2: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 2	- 162 -
Tabulka P5.3: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 3	- 163 -
Tabulka P5.4: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 4	- 164 -
Tabulka P5.5: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 5	- 165 -
Tabulka P5.6: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 6	- 166 -
Tabulka P5.7: Průměrné hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorních vzorků	- 167 -
Tabulka P8.1: Vypočtené hodnoty deformační práce při quasistatickém namáhání	- 175 -
Tabulka P8.2: Naměřené hodnoty úhlů překyvu	- 176 -
Tabulka P8.3: Výsledky průměrných naměřených hodnot deformační práce a odpovídajících součinitelů dynamického působení	- 176 -
Tabulka P8.4: Hodnoty z jednoho měření v quasistatickém režimu.....	- 177 -
Tabulka P9.1: Specifikace umístění švů na laboratorním a zkušební vzorku.....	- 179 -

Tabulka P9.2: Naměřené hodnoty úhlů překyvu	180 -
Tabulka P9.3: Naměřené hodnoty maximální rázové síly	181 -
Tabulka P9.4: Vypočtené hodnoty impulsu rázové síly	181 -
Tabulka P9.5: Výsledky průměrných hodnot	181 -
Tabulka P9.6: Hodnoty z jednoho měření v rázovém režimu.....	182 -
Tabulka P10.1: Specifikace vzorků	185 -
Tabulka P10.2: Naměřené hodnoty absolutního prodloužení vzorku při quasistatickém namáhání a úhlů překyvu při rázovém namáhání	186 -
Tabulka P10.3: Vypočtené hodnoty poměrného prodloužení.....	186 -
Tabulka P10.4: Naměřené hodnoty úhlu překyvu a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu rázového namáhání	187 -
Tabulka P10.5: Naměřené hodnoty absolutního prodloužení a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu quasistatického namáhání	188 -
Tabulka P10.6: Naměřené hodnoty působící síly v průběhu rázového namáhání..	191 -
Tabulka P10.7: Naměřené hodnoty působící síly v průběhu quasistatického namáhání	192 -
Tabulka P10.8: Naměřené hodnoty působící síly a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu rázového namáhání	195 -
Tabulka P10.9: Naměřené hodnoty působící síly a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu quasistatického namáhání	196 -

Seznam grafů:

Graf 2.1: Skladba požadavků na vlastnosti konfekcí.....	16 -
Graf 3.1: Závislost pevnosti švu na hustotě stehů	39 -
Graf 4.1: Závislost deformační práce, maximální rázové síly a impulsu síly na poloze švu	118 -
Graf 4.2: Porovnání poměrného prodloužení při přetrhu vzorku při rázovém a quasistatickém namáhání	121 -
Graf 4.3: Porovnání závislosti poměrného prodloužení na čase při quasistatickém a rázovém namáhání	122 -
Graf 4.4: Porovnání závislosti působící síly na čase při quasistatickém a rázovém namáhání	123 -
Graf 4.5: Porovnání závislosti působící síly na prodloužení při quasistatickém a rázovém namáhání	123 -
Graf P10.1: Závislost poměrného prodloužení na čase při rázovém namáhání	190 -
Graf P10.2: Závislost poměrného prodloužení na čase při quasistatickém namáhání	190 -
Graf P10.3: Závislost síly na čase při rázovém namáhání.....	194 -
Graf P10.4: Závislost síly na čase při quasistatickém namáhání.....	194 -
Graf P10.5: Závislost poměrného prodloužení na působící síle při rázovém namáhání	198 -
Graf P10.6: Závislost poměrného prodloužení na působící síle při quasistatickém namáhání	198 -

10. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO VERIFIKACI VZTAHU PRO VÝPOČET TEORETICKÉ PEVNOSTI ŠVU	139 -
PŘÍLOHA 2: EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO VERIFIKACI KOEFICIENTU ŠVU...	143 -
PŘÍLOHA 3: EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ KOEFICIENTU PEVNOSTI NITI V KLIČCE.....	149 -
PŘÍLOHA 4: EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ KOEFICIENTU POŠKOZENÍ ŠICÍCH NITÍ PŘI ŠITÍ.....	152 -
PŘÍLOHA 5: EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO IDENTIFIKACI MODULŮ NAPJATOSTI	156 -
PŘÍLOHA 6: LABORATORNÍ PŘÍSTROJ CHK/RMI16000	168 -
PŘÍLOHA 7: POSTUP MĚŘENÍ NA LABORATORNÍM PŘÍSTROJI CHK/RMI16000...	169 -
PŘÍLOHA 8: EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ SOUČinitele DYNAMICKÉHO PŮSOBENÍ.....	171 -
PŘÍLOHA 9: ANALÝZA RÁZOVÉ PEVNOSTI ŠVU V ZÁVISLOSTI NA JEHO POLOZE.....	178 -
PŘÍLOHA 10: EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA DEFORMACE RÁZOVĚ NAMÁHANÉHO VZORKU	183 -

PŘÍLOHA 1: EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO VERIFIKACI VZTAHU PRO VÝPOČET TEORETICKÉ PEVNOSTI ŠVU

Úkol měření

Cílem experimentálního měření bylo ověření platnosti vztahu odvozeného teoreticky pro stanovení skutečné příčné pevnosti šitého spoje.

Úkolem bylo experimentálním měřením stanovit skutečnou pevnost spoje a tuto porovnat s teoreticky stanovenou hodnotou. Experimentální zjišťování příčné pevnosti švů vychází z normované metody pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1.

Měřicí zařízení

Dynamometr PROMI PC 3000 (obr. P1.1) – trhací přístroj, který splňuje požadavky dle normy ČSN EN ISO 13935. Přístroj je vybaven měřicí jednotkou, která odečítá hodnoty síly $F[N]$ a prodloužení $\Delta l [mm]$, a výpočetní jednotkou pro samočinné zapisování naměřených hodnot do tabulek a jejich znázornění do grafu.

Parametry přístroje:

- | | |
|-------------------|------------------------|
| - rozsah zatížení | 0-1000 N |
| - rozsah pojezdu | 0-450 mm |
| - přesnost | $\pm 0,05\%$ z rozsahu |

Nastavení přístroje:

- | | |
|---------------------------|------------|
| - upínací délka | 200 mm |
| - rychlost posuvu čelistí | 100 mm/min |



Obrázek P1.1: Zkušební přístroj PROMI PC 3000

Příprava vzorků

Šitý materiál

- druh materiálu	technické plátno
- složení materiálu	100 % bavlna
- dostava (Do/Dú)	26/13
- plošná hmotnost	290 g/m ²
- vazba	plátňová
- šíře	140 cm

Šicí nit

- druh (výrobce)	Saba ^c (Amann)
- složení	100% PES
- jemnost	120
- konstrukce	jádrová
- pevnost	1000 cN
- pevnost v kličce	700 cN

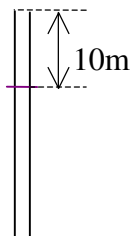
Šicí technika

- šicí stroj	JUKI DDL 5530 (jednojahlový šicí stroj s dvounitným vázaným stehem)
- jemnost šicí jehly	80

Specifikace švu

Hřbetový šev

- druh švu	1.01.01
- šířka švové záložky	10 mm
- použitý steh	301
- hustota stehu	2, 4, 6 stehy/cm



Obrázek P1.2: Schematické znázornění provedení hřbetového švu

Postup zhotovení vzorků

Zhotovení vzorků bylo realizováno v souladu s normou pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1.

Z plošné textilie byl vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech 350 mm x 1 200 mm tak, že delší strana byla položená po útku, a z něhož bylo připraveno 10 zkušebních vzorků.

Postup zkoušky

Vzorek se upne do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu. Po spuštění se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí. Zaznamenává se síla potřebná k přetrhu prvního stehu švu a změna délky při této síle.

Zpracování naměřených dat

Stanovení pevnosti švu

Pevnost švu byla stanovena ze vztahu

$$F_{š(v)} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot (h \cdot b + 10) \cdot F_n \cdot F_{nkp} \cdot F_{nš} \cdot \alpha \quad (\text{P1.1})$$

kde: $F_{š(v)}$pevnost švu vypočtená [N]

F_n pevnost nitě v tahu [N]

F_{nkp} ... poměrná pevnost nitě v kličce [% z výchozí pevnosti nitě v tahu]

$F_{nš}$ poměrná pevnost nitě po šití [% z výchozí pevnosti nitě v tahu]

h hustota stehu [cm^{-1}]

b šířka vzorku (délka švu) [mm]

α koeficient švu

Statistické zpracování naměřených hodnot:

Průměr \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{P1.2})$$

kde: n ... počet měření

x_i ... naměřená hodnota

Rozptyl s^2

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{P1.3})$$

Směrodatná odchylka s

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{P1.4})$$

Variační koeficient v

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (\text{P1.5})$$

Výsledky měření

Vstupní hodnoty:

pevnost nitě v tahu:	$F_n = 1000 \text{ cN}$
poměrná pevnost nitě v kličce:	$F_{nkp} = 70 \%$
poměrná pevnost nitě po šití:	$F_{nš} = 80 \%$
hustota stehu:	$h = 2, 4, 6 \text{ cm}^{-1}$
šířka vzorku (délka švu) :	$b = 50 \text{ mm}$
koeficient švu:	$\alpha = 1$

Vypočtená hodnota příčné pevnosti švu:

pro hustotu 2 s/cm	$F_{š(v)} = 123,2 \text{ N}$
pro hustotu 4 s/cm	$F_{š(v)} = 235,2 \text{ N}$
pro hustotu 6 s/cm	$F_{š(v)} = 347,2 \text{ N}$

Naměřené hodnoty příčné pevnosti švu:

Při měření příčné pevnosti švů došlo u všech měřených vzorků k přetrhu nitě ve švu.

Tabulka P1.1: Naměřené hodnoty příčné pevnosti

hustota stehu	2	4	6
číslo vzorku	$F_{š} [\text{N}]$	$F_{š} [\text{N}]$	$F_{š} [\text{N}]$
1	136,0	235,0	325,0
2	108,0	190,0	300,0
3	119,0	190,0	340,0
4	128,0	220,0	300,0
5	140,0	220,0	300,0
6	123,0	220,0	295,0
7	130,0	215,0	295,0
8	130,0	208,0	350,0
9	122,0	235,0	260,0
10	140,0	190,0	320,0
průměr	127,6	212,3	308,5
s	10,0	17,4	25,9
v [%]	7,8	8,2	8,4

Vyhodnocení a závěr měření

Srovnáním výsledků vypočtené hodnoty příčné pevnosti šitého spoje s pevností skutečně naměřenou bylo zjištěno, že jsou srovnatelné, resp. vypočtená hodnota převyšuje naměřenou hodnotu příčné pevnosti. Do vztahu pro výpočet pevnosti byly dosazeny hodnoty koeficientů pevnosti v kličce a koeficientů opotřebení šicí nitě, které doporučuje výrobce nití. Jedná se o empirické hodnoty, které způsobí jistou nepřesnost. Přesto se vypočtená hodnota blíží skutečnosti. V praxi je zřejmě nutno počítat s nižší hodnotou pevnosti, zvláště při vyšších hustotách stehu, kdy bude patrně vyšší koeficient opotřebení.

PŘÍLOHA 2:

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO VERIFIKACI KOEFICIENTU ŠVU

Úkol měření

Cílem experimentálního měření bylo ověření vlivu způsobu provedení švu na koeficient švu α , který by byl využitelný pro teoretické stanovení příčné pevnosti šitého spoje.

Prvotním úkolem bylo experimentálním měřením stanovit skutečnou pevnost různě provedených švů. Experimentální zjišťování příčné pevnosti švů vychází z normované metody pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935- 1.

Měřicí zařízení

Dynamometr PROMI PC 3000

Parametry přístroje:

- | | |
|-------------------|------------------------|
| - rozsah zatížení | 0-1000 N |
| - rozsah pojezdu | 0-450 mm |
| - přesnost | $\pm 0,05\%$ z rozsahu |

Nastavení přístroje:

- | | |
|---------------------------|------------|
| - upínací délka | 200 mm |
| - rychlost posuvu čelistí | 100 mm/min |

Příprava vzorků

Šitý materiál

- | | |
|---------------------|----------------------|
| - druh materiálu | technické plátno |
| - složení materiálu | 100 % bavlna |
| - dostava (Do/Dú) | 26/13 |
| - plošná hmotnost | 290 g/m ² |
| - vazba | plátnová |
| - šíře | 140 cm |

Šicí nit

- | | |
|------------------|---------------------------|
| - druh (výrobce) | Saba ^c (Amann) |
| - složení | 100% PES |
| - jemnost | 120 |
| - konstrukce | jádrová |

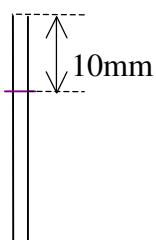
Šicí technika

- | | |
|----------------------|---|
| - šicí stroje | JUKI DDL 5530 (jednořehlový šicí stroj s dvounitným vázaným stehem)
JUKI ML11 (jednořehlový šicí stroj s jednonitným řetízkovým stehem)
MINERVA (jednořehlový š. stroj s dvounitným vázaným stehem klikatým)
YAMATO (jednořehlový šicí stroj s dvounitným řetízkovým stehem) |
| - jemnost šicí jehly | 80 |

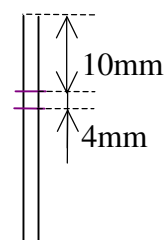
Specifikace švů

Hřbetový šev

- druh švu 1.01.01, 1.01.03
- šířka švové záložky 10 mm
- použité stehy 301, 101, 304, 401
- hustota stehu 4 stehy/cm
- rozpích 4 mm
- vzdálenost stehových řádků 4 mm



1.01.01

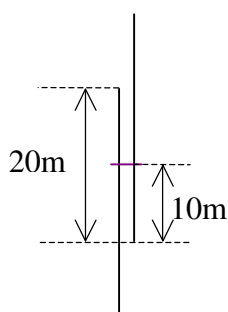


1.01.03

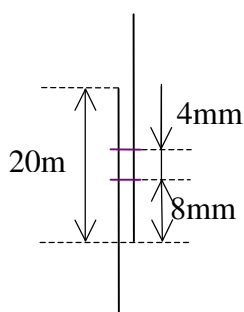
Obrázek P2.1: Schematické znázornění provedení hřbetových švů

Jednoduché přeplátované švy

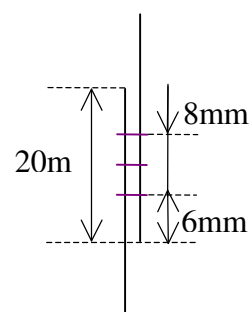
- druh švu 2.01.01, 2.01.03, 2.01.07
- šířka švové záložky min 10 mm
- použité stehy 301
- hustota stehu 4 stehy/cm
- vzdálenost stehových řádků 4 mm



2.01.01



2.01.03

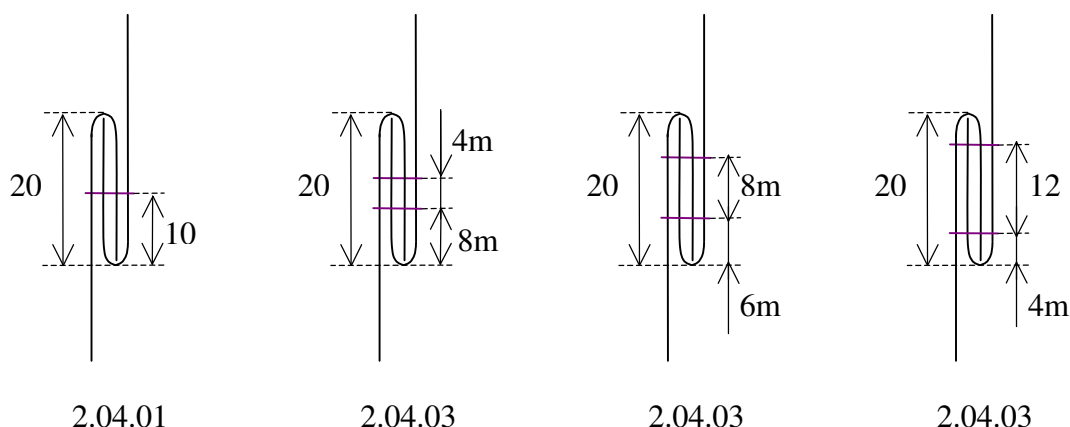


2.01.07

Obrázek P2.2: Schematické znázornění jednoduchých přeplátovaných švů

Zakládání přeplátované švy

- druh švu 2.04.01, 2.04.03
- šířka švové záložky min 30 mm
- použité stehy 301
- hustota stehu 4 stehy/cm
- vzdálenost stehových řádků 4, 8, 12 mm



Obrázek P2.3: Schematické znázornění zakládání přeplátovaných švů

Postup zhotovení vzorků

Zhotovení vzorků bylo realizováno v souladu s normou pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1.

Z plošné textilie byl vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech 350 mm x 1 200 mm tak, že delší strana byla položena po útku.

Koeficienty švů byly určovány pro vybrané zástupce švů (viz specifikace švů).

Postup zkoušky

Vzorek se upne do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu. Po spuštění se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí. Zaznamenává se síla potřebná k přetrhu prvního stehu švu a změna délky při této síle.

Zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty byly zpracovány statisticky.

Stanovení koeficientu švu

Koeficient švu α byl stanoven ze vztahu

$$\alpha = \frac{F_{\text{šv}}}{F_{\text{šz}}} \quad (\text{P2.1})$$

kde: $F_{\text{šz}}$... průměrná pevnost základního švu 1.01.01/301 [N]
 $F_{\text{šv}}$... průměrná pevnost vyšetřovaného švu [N]

Vypočtené hodnoty koeficientu švu viz tab. P2.6.

Výsledky měření

Naměřené hodnoty příčné pevnosti švu a prodloužení vzorku byly zaznamenány do tabulek (viz tabulky č. P2.1-P2.5).

Při měření příčné pevnosti švů došlo u všech měřených vzorků k přetrhu nitě ve švu.

Tabulka P2.1: Jednořádkové švy s odlišným druhem švu

Šev/steh	1.01.01/301		2.01.01/301		2.04.01/301	
č.vz.	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$
1	235,0	16,0	245,0	19,1	220,0	17,3
2	190,0	16,5	202,0	16,5	285,0	18,4
3	190,0	15,5	221,0	15,6	247,0	18,7
4	220,0	17,0	191,0	15,1	289,0	17,5
5	220,0	17,0	211,0	16,1	265,0	16,2
6	220,0	16,0	235,0	16,0	261,0	19,7
7	215,0	15,5	217,0	15,4	265,0	17,1
8	208,0	23,0	226,0	15,7	225,0	17,5
9	235,0	20,0	215,0	15,6	245,0	17,6
10	190,0	15,5	233,0	15,3	249,0	16,4
průměr	212,3	17,2	219,6	16,0	255,1	17,6
s	17,4	2,4	16,1	1,2	22,7	1,1
$v [\%]$	8,2	14,2	7,3	7,2	8,9	6,0

Tabulka P2.2: Jednořádkové švy s odlišným druhem stehu

Šev/steh	1.01.01/101		1.01.01/304		1.01.01/401	
č.vz.	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$
1	185,0	22,5	261,0	20,0	250,0	19,0
2	165,0	20,0	229,0	19,5	270,0	20,0
3	185,0	20,5	202,0	19,0	250,0	18,5
4	180,0	21,0	222,0	21,0	225,0	22,0
5	178,0	22,0	234,0	19,0	250,0	20,0
6	130,0	18,0	194,0	19,0	270,0	20,0
7	188,0	22,0	213,0	18,0	255,0	19,0
8	180,0	22,0	189,0	18,5	280,0	21,0
9	175,0	21,0	208,0	16,5	250,0	19,0
10	130,0	18,0	239,0	17,5	235,0	20,0
průměr	169,6	20,7	219,1	18,8	253,5	19,9
s	21,8	1,6	22,3	1,3	16,5	1,1
$v [\%]$	12,9	7,8	10,2	6,8	6,5	5,3

Tabulka P2.3: Víceřádkové jednoduché přeplátované švy

Šev/steh	2.01.01/301		2.01.03/301(4mm)		2.01.07/301(4+4mm)	
č.vz.	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$
1	245,0	19,1	419,0	23,9	732,0	32,5
2	202,0	16,5	457,0	27,9	626,0	30,7
3	221,0	15,6	414,0	24,5	608,0	28,8
4	191,0	15,1	493,0	27,4	646,0	27,8
5	211,0	16,1	389,0	21,5	657,0	33,5
6	235,0	16,0	459,0	26,8	564,0	26,2
7	217,0	15,4	399,0	23,8	675,0	29,5
8	226,0	15,7	370,0	22,4	689,0	29,0
9	215,0	15,6	461,0	26,6	574,0	26,9
10	233,0	15,3	373,0	24,0	568,0	27,8
průměr	219,6	16,0	423,4	24,9	633,9	29,3
s	16,1	1,2	42,1	2,2	56,4	2,4
$v [\%]$	7,3	7,2	9,9	8,8	8,9	8,1

Tabulka P2.4: Dvouřádkové švy s odlišným druhem švu

Šev/steh	1.01.03/301(4mm)		2.01.03/301(4mm)		2.04.03/301(4mm)	
č.vz.	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$
1	300,0	24,0	419,0	23,9	539,0	28,2
2	270,0	21,0	457,0	27,9	448,0	24,9
3	235,0	19,0	414,0	24,5	459,0	26,2
4	235,0	19,0	493,0	27,4	436,0	27,2
5	275,0	22,0	389,0	21,5	446,0	23,4
6	235,0	23,0	459,0	26,8	449,0	21,8
7	250,0	21,0	399,0	23,8	501,0	27,9
8	250,0	23,0	370,0	22,4	465,0	25,8
9	260,0	19,0	461,0	26,6	447,0	24,0
10	250,0	20,0	373,0	24,0	473,0	27,2
průměr	256,0	21,1	423,4	24,9	466,3	25,7
s	20,9	1,9	42,1	2,2	31,5	2,1
$v [\%]$	8,2	8,8	9,9	8,8	6,8	8,2

Tabulka P2.5: Dvouřádkové přeplátované švy s odlišnou vzdáleností stehových řádků

Šev/steh	2.04.03/301(4mm)		2.04.03/301(8mm)		2.04.03/301(12mm)	
č.vz.	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$	$F [N]$	$\Delta l [mm]$
1	539,0	28,2	425,0	23,0	480,0	26,3
2	448,0	24,9	475,4	25,6	450,8	25,9
3	459,0	26,2	478,0	26,4	498,3	25,4
4	436,0	27,2	389,7	22,3	451,3	23,8
5	446,0	23,4	520,3	26,8	552,1	26,2
6	449,0	21,8	558,2	28,5	548,3	26,1
7	501,0	27,9	460,8	23,5	450,0	24,9
8	465,0	25,8	480,0	26,2	538,0	26,0
9	447,0	24,0	461,0	24,8	472,3	25,4
10	473,0	27,2	517,0	27,9	432,4	25,8
průměr	466,3	25,7	476,5	25,5	487,4	25,6
s	31,5	2,1	48,2	2,1	44,6	0,8
$v [\%]$	6,8	8,2	10,1	8,1	9,2	3,0

Tabulka P2.6: Vypočtené průměrné hodnoty příčné pevnosti švů F_s a koeficientů α

použitý druh švu	použitý druh stehu	$F_s [N]$	α
jednořádkový hřbetový 1.01.01	dvounitný vázaný 301	212,3	1,00
jednořádkový hřbetový 1.01.01	jednonitný řetízkový 101	169,6	0,80
jednořádkový hřbetový 1.01.01	dvounitný vázaný 304	219,1	1,03
jednořádkový hřbetový 1.01.01	dvounitný řetízkový 401	253,5	1,19
jednořádkový přeplátovaný 2.01.01	dvounitný vázaný 301	219,6	1,03
jednořádkový zakládáný 2.04.01	dvounitný vázaný 301	255,1	1,20
dvouřádkový hřbetový 1.01.03 (4mm)	dvounitný vázaný 301	256,0	1,21
dvouřádkový přeplátovaný 2.01.03 (4mm)	dvounitný vázaný 301	423,4	1,99
dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (4mm)	dvounitný vázaný 301	466,3	2,20
třířádkový přeplátovaný 2.01.07 (4+4mm)	dvounitný vázaný 301	633,9	2,99
dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (8mm)	dvounitný vázaný 301	476,5	2,25
dvouřádkový zakládáný 2.04.03 (12mm)	dvounitný vázaný 301	487,4	2,30

PŘÍLOHA 3: EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ KOEFICIENTU PEVNOSTI NITĚ V KLIČCE

Úkol měření

Cílem experimentu bylo experimentálně stanovit koeficient pevnosti nitě v kličce.

Experiment se zaměřoval na vysoce pevné šicí nitě, u kterých se dle [10] výrazně snižuje pevnost při namáhání v ohybu. Naměřené hodnoty byly získány z [34].

Měřicí zařízení

Dynamometr TIRATEST 2300 (trhací přístroj pro stanovení mechanických vlastností materiálů)

Nastavení přístroje:

- | | |
|-------------------------------|------------|
| - upínací délka | 500 mm |
| - síla pro předpětí | 1 N |
| - rychlost posuvu do předpětí | 10 mm/min |
| - rychlost posuvu při měření | 100 mm/min |

Měřené hodnoty:

- | | |
|----------------------------|------------------|
| - modul pružnosti | E |
| - maximální dosažená síla | F_{max} |
| - maximální tažnost | ϵ_{max} |
| - celkový čas zkoušky | t |
| - skutečná rychlost měření | v |
| - práce (celá zkouška) | W |

Šicí nitě

Tabulka P3.1: Specifikace použitých šicích nití

výrobce	druh nití	jemnost [dtex]	zákrut [m^{-1}]	vlákná
Nomexové nitě				
Amann	N-tech 70	480(3)	Z 684 m^{-1}	střížová
Gütermann	L 753	750(3)	Z 380 m^{-1}	nekonečná
	L 502	500(2)	Z 537 m^{-1}	nekonečná
Orikon	Fenilon F9	1485(9)	Z 300 m^{-1}	střížová
	Fenilon F12	1980(12)	Z 300 m^{-1}	střížová
	Nomex F3	495(3)	Z 375 m^{-1}	střížová
Coats	Firefly Tkt 40	750(3)	Z 327 m^{-1}	střížová
	Firefly Tkt 70	510(3)	Z 548 m^{-1}	střížová
	CF Nomex 40	660(3)	Z 427 m^{-1}	nekonečná
Kevlarové nitě				
Amann	K-tech 50	633(3)	Z 414 m^{-1}	střížová
	K-tech 75	422(2)	Z 507 m^{-1}	střížová
Orikon	Twaron	420(1)	Z 250 m^{-1}	nekonečná
	Technora	440(1)	Z 300 m^{-1}	nekonečná
Coats	50/4 Kevlar	800(4)	Z 346 m^{-1}	nekonečná
Polyesterové nitě				
Coats	ASTRA	289(2)	Z 380 m^{-1}	střížová
Amann	Saba ^c	282(2)	Z 380 m^{-1}	nekonečná

Postup zkoušky

Vzorek nitě se upne do čelistí v lineárním stavu nebo v kličce tak, aby klička byla uprostřed. Po spuštění se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí. Zaznamenává se síla potřebná k přetrhu nitě. V obou případech bylo provedeno 25 měření pro každý typ nitě.

Výsledky měření a zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek (viz [34]), statisticky zpracovány a vyhodnoceny průměrné hodnoty pevností v lineárním stavu a v kličce (tab. P3.2). Koeficient pevnosti v kličce byl stanoven ze vztahu

$$\varphi = \frac{F_{nk}}{2 \cdot F_n} \quad (\text{P3.1})$$

kde: φ koeficient pevnosti nitě v kličce
 F_{nk} pevnost nitě v kličce
 F_n pevnost nitě v lineárním stavu

Tabulka P3.2: Průměrné hodnoty absolutních pevností v lineárním stavu a v kličce

nit	F [N]	F_{kl} [N]	φ
Nomexové nitě			
N-tech 70	14,28	23,81	0,834
L 753	27,14	42,99	0,792
L 502	16,40	25,21	0,769
Fenilon F9	33,88	59,10	0,872
Fenilon F12	47,15	81,11	0,860
Nomex F3	9,69	17,98	0,928
Firefly Tkt 40	21,51	37,23	0,865
Firefly Tkt 70	11,26	20,84	0,925
CF Nomex 40	25,33	43,72	0,863
Kevlarové nitě			
K-tech 50	78,50	72,53	0,462
K-tech 75	48,72	47,41	0,487
Twaron	65,44	37,16	0,284
Technora	87,23	52,98	0,304
50/4 Kevlar	113,80	80,35	0,353
Polyesterové nitě			
ASTRA	7,23	12,91	0,893
Saba ^c	10,17	14,94	0,735

Vyhodnocení a závěr měření

Z výsledků experimentu vyplývá, že největší vliv má složení nitě a délka vlákna:

- nomexové nitě mají při srovnatelných parametrech větší koeficient pevnosti v kličce než kevlarové nitě
- koeficient pevnosti v kličce nomexových nití se pohybuje v rozmezí hodnot 0,8 - 0,9, u kevlarových nití v rozmezí 0,35 – 0,45 (zatímco lineární pevnost kevlarových nití je při srovnatelných parametrech vyšší než u nomexových nití)
- nitě skané ze střížových vláken mají větší koeficient pevnosti v kličce než nitě z nekonečného vlákna
- vícenásobně skané nitě vykazují větší koeficient pevnosti v kličce než nitě skané z méně přízí nebo nitě jednoduché
- nitě s vyšším zákrutem mají větší koeficient pevnosti v kličce než nitě s nižším zákrutem

PŘÍLOHA 4: **EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ KOEFICIENTU POŠKOZENÍ ŠICÍCH NITÍ** **PŘI ŠITÍ**

Úkol měření

Cílem experimentu bylo experimentálně stanovit koeficient poškození niti při šití, který vyjadřuje úbytek pevnosti šicí nitě po procesu šití.

Úbytky pevnosti nití jsou analyzovány pro vytypované zástupce šicích nití, a to v závislosti na druhu šicí nitě, druhu stehu, hustotě stehu a tloušťce vrstev spojovaného materiálu.

Naměřené hodnoty byly získány z [35]. Experiment se zaměřoval na klasické a pevné šicí nitě, které jsou nejčastěji využívány v procesu šití.

Měřicí zařízení

ZT 400 typ 178 11

Nastavení přístroje:

- upínací délka 250 mm

Příprava vzorků

Šitý materiál

- druh materiálu roletovina
- složení materiálu 100 % PES
- dostava (Do/Dú) 28/20
- plošná hmotnost 180 g/m²
- vazba plátňová
- šíře 140 cm

Šicí nit

Astra (Coats)

- složení 100% PES
- jemnost 80
- konstrukce 2x skaná, střížová vlákna

Epic (Coats)

- složení 100% PES
- jemnost 80
- konstrukce jádrová

Kevlar (Coats)

- složení 100% Kevlar
- jemnost 75
- konstrukce 3x skaná, nekonečná vlákna

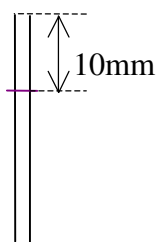
Šicí technika

- | | |
|----------------------|--|
| - šicí stroje | JUKI DDL 5530 (jednoehlový šicí stroj
s dvounitným vázaným stehem)
YAMATO/DURKOPP (jednoehlový šicí stroj
s dvounitným řetízkovým stehem) |
| - jemnost šicí jehly | 100 |

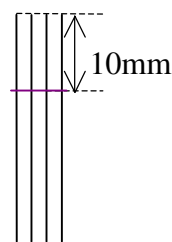
Specifikace švů a stehů

Hřbetový šev

- | | |
|------------------------|--|
| - druh švu | 1.01.01, 1.06.01 |
| - šířka švové záložky | 10 mm |
| - délka švu | 350 mm |
| - druh a hustota stehu | 301
→ 3 stehy/cm na 2 vrstvách materiálu
→ 6 stehů/cm na 2 vrstvách materiálu
→ 3 stehy/cm na 4 vrstvách materiálu
401
→ 3 stehy/cm na 2 vrstvách materiálu
→ 6 stehů/cm na 2 vrstvách materiálu
→ 3 stehy/cm na 4 vrstvách materiálu |



1.01.01



1.06.01

Obrázek P4.1: Schematické znázornění použitých švů

Postup zhotovení vzorků

Pro každý druh nitě a každý druh švu dle výše uvedené specifikace byly zhotoveny vzorky švů. Jehelní i spodní nit byly získávány šetrným páráním.

Postup zkoušky

Vzorek nitě se upne do čelistí v lineárním stavu. Zaznamenává se síla potřebná k přetrhu nitě.

Zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty byly zpracovány statisticky (tab. P4.1, P4.2).

Pevnosti opotřebovaných nití byly porovnány s pevností nitě, která neprošla procesem šití.

Stanovení koeficientu opotřebování nití

Koeficient švu ψ byl stanoven ze vztahu (3.8) resp. ze vztahu:

$$\psi = \frac{F_{nš}}{100} = \frac{F_{no}}{F_n} \quad (\text{P4.1})$$

kde: $F_{nš}$... pevnost nití po šití (vyjádřená v procentech původní pevnosti) [%]

F_{no} ... průměrná pevnost nitě po opotřebování [N]

F_n ... průměrná pevnost nitě (původní) [N]

Vypočtené hodnoty koeficientu opotřebování viz tab. P4.3.

Výsledky měření

Tabulka P4.1: Naměřené hodnoty pevnosti nitě před šitím

nit	Astra	Epic	Kevlar
č. vzorku	F_n	F_n	F_n
1	8,80	12,50	30,50
2	8,20	12,50	18,50
3	8,80	12,40	20,80
4	12,00	12,60	30,00
5	8,80	12,50	32,50
6	8,80	12,60	32,50
7	8,20	12,20	24,80
8	10,40	12,50	24,20
9	10,00	12,50	34,50
10	10,50	12,60	26,60
průměr	9,45	12,49	27,49
s	1,23	0,12	5,37
v [%]	13,02	0,96	19,52

Tabulka P4.2: Průměrné hodnoty pevnosti nitě po šití

F_{no}		3 s/cm 2 vrstvy			6 s/cm 2 vrstvy			3 s/cm 4 vrstvy		
		Astra	Epic	Kevlar	Astra	Epic	Kevlar	Astra	Epic	Kevlar
301	JN	6,33	10,03	17,95	5,01	7,92	13,80	5,97	8,69	16,88
	SN	7,48	11,54	19,66	6,72	9,65	18,89	6,94	10,44	19,41
401	JN	8,51	12,13	-	8,16	11,42	-	8,26	12,03	-
	SN	9,39	12,48	-	8,39	12,18	-	9,19	12,25	-

Tabulka P4.3: Vypočtené hodnoty koeficientu po opotřebení

Ψ		3 s/cm 2 vrstvy			6 s/cm 2 vrstvy			3 s/cm 4 vrstvy		
		Astra	Epic	Kevlar	Astra	Epic	Kevlar	Astra	Epic	Kevlar
301	JN	0,670	0,803	0,653	0,530	0,634	0,502	0,632	0,696	0,614
	SN	0,792	0,924	0,715	0,711	0,773	0,687	0,734	0,836	0,706
401	JN	0,901	0,971	-	0,863	0,914	-	0,874	0,963	-
	SN	0,994	0,999	-	0,888	0,975	-	0,973	0,981	-

Vyhodnocení a závěr měření

Výsledky experimentu potvrdily vliv druhu nitě na koeficient opotřebení

- spodní nit má vždy nižší opotřebení než jehelní nit
- nejnižší opotřebení má nit Epic (jádrová PES)

Výsledky experimentu potvrdily vliv druhu stehu na koeficient opotřebení

- steh 401 vykazoval velmi nízké opotřebení
- steh 301 vykazoval pro klasické spojovací podmínky (tj. 2 vrstvy materiálu, 3 s/cm, střížová nit) koeficient opotřebení jehelní nitě 0,7; koeficient opotřebení spodní nitě 0,8

Výsledky experimentu potvrdily vliv hustoty stehu a počtu spojovaných vrstev na koeficient opotřebení

- vyšší hustota stehu a vyšší počet vrstev znamená vyšší opotřebení
- větší vliv na opotřebení má hustota stehu

PŘÍLOHA 5:

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRO IDENTIFIKACI MODULŮ NAPJATOSTI

Úkol měření

Prvním úkolem experimentu bylo získat soubor snímků původních a deformovaných obrazců (segmentů) zakreslených na textilií.

Druhým úkolem bylo vytvořit databázi souřadnic bodů (vrcholů segmentů) pomocí analýzy obrazu, která poskytne vstupní data pro vyhodnocení posuvů bodů.

Měřicí zařízení

Dynamometr PROMI PC 3000

Parametry přístroje:

- | | |
|-------------------|------------------------|
| - rozsah zatížení | 0-1000 N |
| - rozsah pojezdu | 0-450 mm |
| - přesnost | $\pm 0,05\%$ z rozsahu |

Nastavení přístroje:

- | | |
|-------------------|-----------|
| - upínací délka | 200 mm |
| - rychlost měření | 50 mm/min |
| - maximální síla | 25 N |

Příprava vzorků

Šitý materiál

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| - druh materiálu | tkanina |
| - složení osnovy | 100 % bavlna |
| - složení útku | 98/2 % bavlna/elastan |
| - dostava (Do/Dú) | 30/20 |
| - plošná hmotnost | 220 g/m ² |
| - vazba | keprová |
| - šíře | 140 cm |

Šicí nit

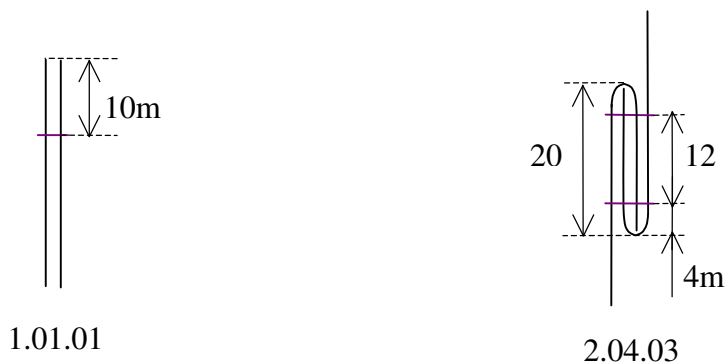
- | | |
|------------------|---------------------------|
| - druh (výrobce) | Saba ^c (Amann) |
| - složení | 100% PES |
| - jemnost | 120 |
| - konstrukce | jádrová |

Šicí technika

- | | |
|----------------------|---|
| - šicí stroje | JUKI DDL 5530 (jednořehlový šicí stroj s dvounitným vázaným stehem) |
| - jemnost šicí jehly | 80 |

Specifikace švů

- | | |
|------------------------------|------------------|
| - druh švu | 1.01.01, 2.04.03 |
| - šířka švové záložky | min 10 mm |
| - druh stehu | 301 |
| - hustota stehu | 4 stehy/cm |
| - vzdálenost stehových řádků | 12 mm |



Obrázek P5.1: Schematické znázornění provedení vybraných zástupců švů

Postup zhotovení vzorků

Příprava vzorků se švy vychází z části z normy pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1.

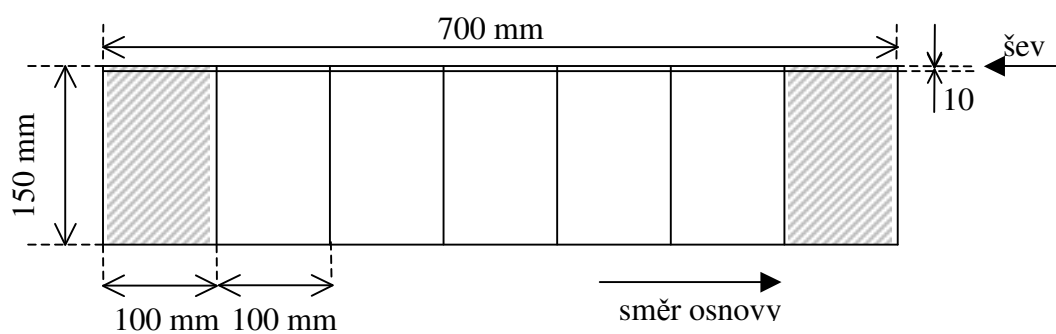
Z plošné textilie byl vystřižen laboratorní vzorek o stanovených rozměrech (pro příčné namáhání 700 mm x 300 mm; pro podélné namáhání 1700 mm x 100 mm) tak, že delší strana byla položena po osnově. Vzorek byl po osnově v polovině přeložen a přestřižen. V tomto směru byl zhotoven požadovaný šev. Moduly rovinné napjatosti byly určovány pro vybrané zástupce švů (viz obr. P5.1), šití bylo rovné a jednotlivé nitě byly dokonale provázány.

Z obou bočních stran laboratorního vzorku (obr. P5.2, P5.3) bylo odstřiženo 100 mm do odpadu (tyto části se nehodnotí). Ze zbývajících částí byla pro každý experiment připravena sada pěti zkušebních vzorků, které byly vystřižením upraveny na požadovaný tvar.

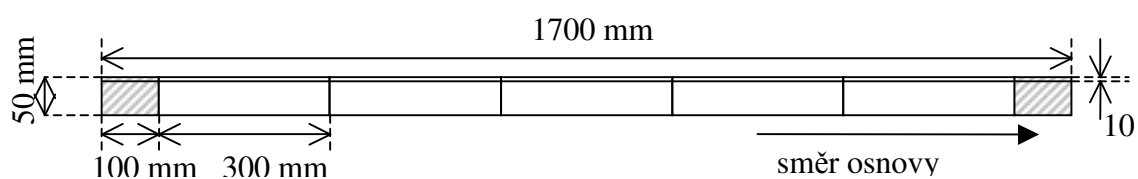
- pro vzorky připravené pro příčné namáhání byly provedeny následující úpravy: každý zkušební vzorek byl čtyřikrát nastřižen ve vzdálenosti 20 mm od švu do hloubky 25 mm a zbytek materiálu byl odstřižen po útku tak, aby skutečná šířka vzorku byla 50 mm (obr. P5.4)
- vzorky připravené pro podélné namáhání byly upraveny na šířku 50 mm tak, aby šev byl ve středu vzorku, rovnoběžně s okrajem (obr. P5.5).

Vzorky bez švů byly připraveny z laboratorního vzorku o rozměrech 300 mm x 600 mm, ze kterého byly vystřiženy dvě sady po pěti zkušebních vzorcích 300 mm x 50 mm. Jedna sada byla střižena po osnově, jedna sada po útku (obr. P5.6).

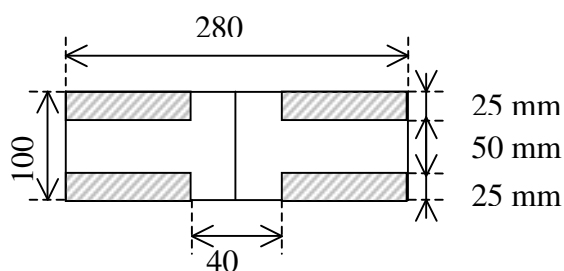
Na každý zkušební vzorek byl zakreslen obrazec – pravoúhlý čtyřúhelník stanoveného rozměru 10 mm x 5 mm tak, aby střed obrazce ležel na švu (u vzorků bez švu uprostřed vzorku) a delší strana byla rovnoběžná se švem (obr. P5.7, P5.8).



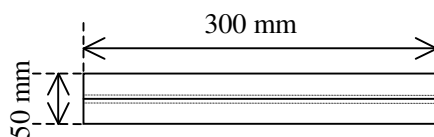
Obrázek P5.2: Laboratorní vzorek připravený pro příčné namáhání



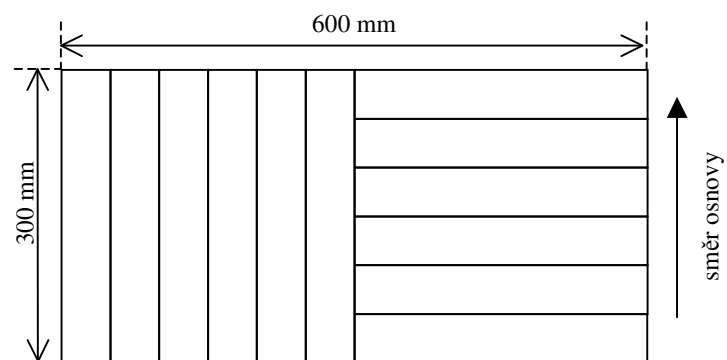
Obrázek P5.3: Laboratorní vzorek připravený pro podélné namáhání



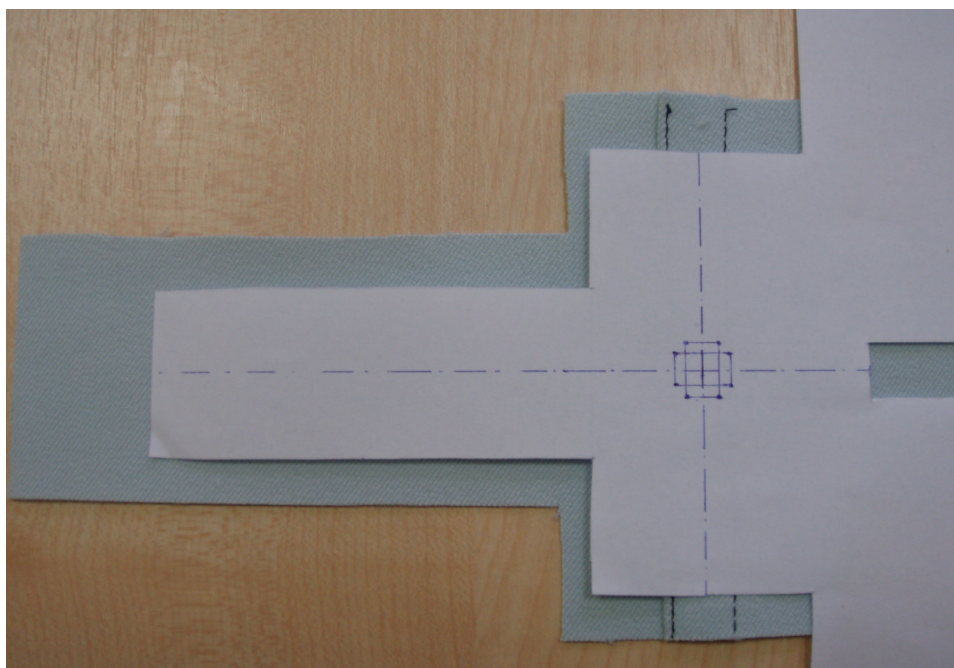
Obrázek P5.4: Zkušební vzorek upravený pro příčné namáhání



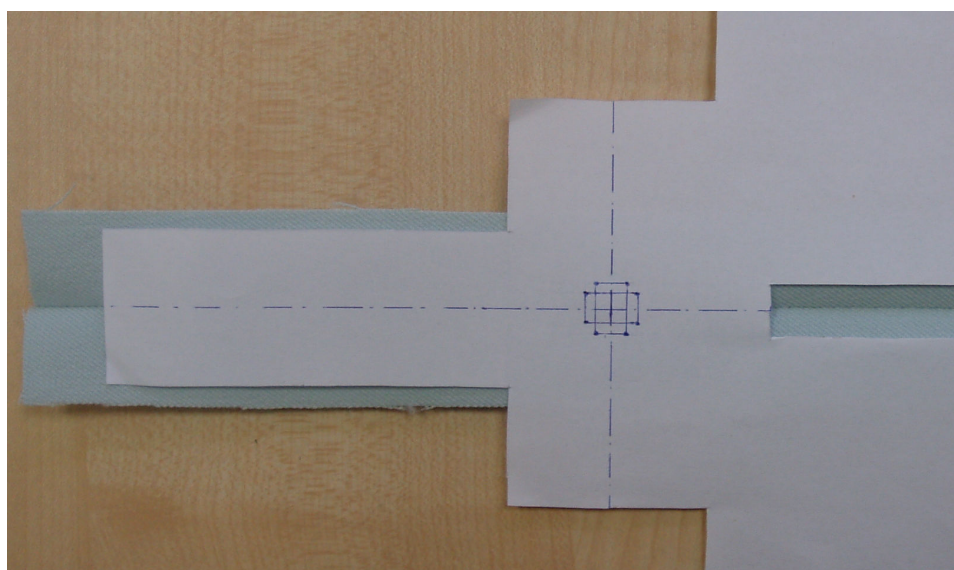
Obrázek P5.5: Zkušební vzorek upravený pro podélné namáhání



Obrázek P5.6: Laboratorní vzorek bez švů



Obrázek P5.7: Umístění šablony a zakreslení bodů – vrcholů segmentů – na vzorky pro příčné namáhání



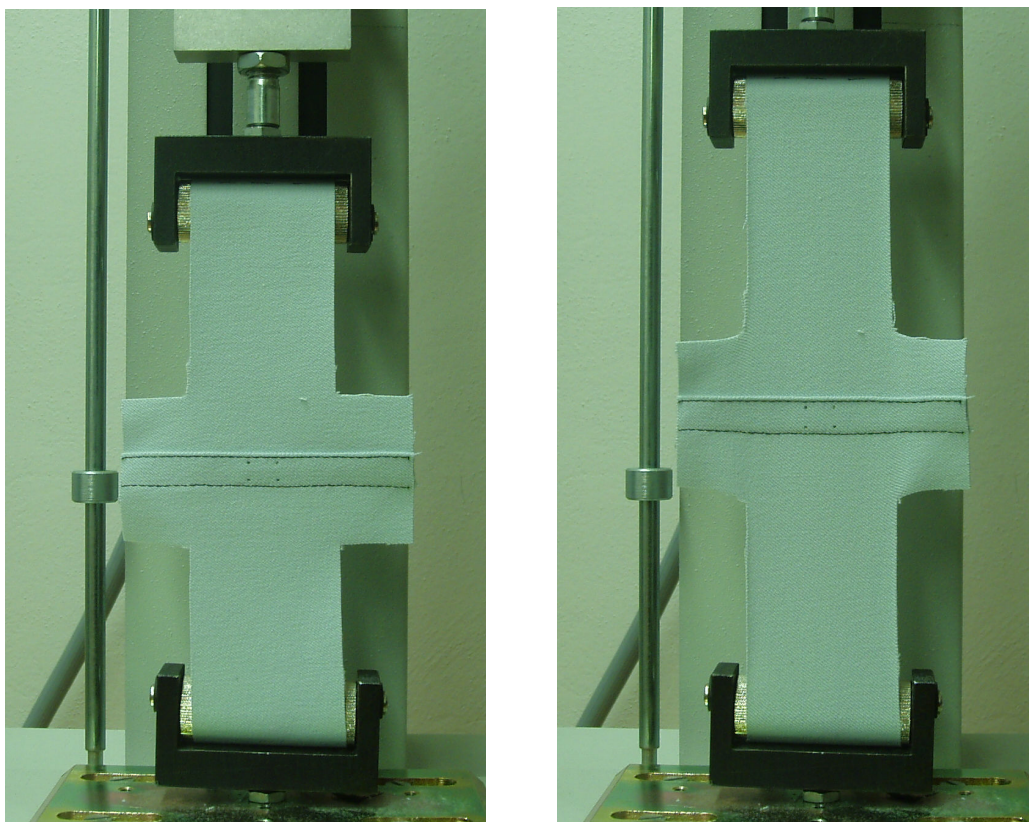
Obrázek P5.8: Umístění šablony a zakreslení bodů – vrcholů segmentů – na vzorky pro podélné namáhání

Postup zkoušky

Vzorek byl upnut do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu (v případě příčného namáhání) nebo podél švu (v případě podélného namáhání). Po spuštění se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí do dosažení stanovené síly (25 N).

Snímky byly pořízeny ze stejné vzdálenosti pomocí digitálního fotoaparátu vždy před spuštěním čelisti a ihned po dosažení stanovené síly (obr. P5.9).

Pomocí analýzy obrazu byla vytvořena databáze souřadnic bodů (vrcholů segmentů).



Obrázek P5.9: Obrazový záznam průběhu zkoušky (příklad příčného namáhání)

Zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty byly zpracovány statisticky.

Výsledky měření

Výsledky měření byly zaznamenány do tabulek (tab. P5.1-P5.7)

Pro každou skupinu zkušebních vzorků byla stanovena průměrná hodnota materiálových a prostorových souřadnic (x_1^o , x_2^o , x_1 , x_2) daného vrcholu (1, 2, 3, 4) původního a deformovaného obrazce.

Tabulka P5.1: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 1

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
1.1	1	208,958	243,542	188,958	245,000
	2	209,375	233,542	189,583	235,625
	3	215,000	233,958	198,125	235,625
	4	214,792	243,542	197,500	245,208
1.2	1	218,542	245,417	200,625	247,500
	2	218,750	235,417	200,625	237,917
	3	225,000	235,417	209,375	238,125
	4	224,583	245,417	208,958	247,917
1.3	1	214,375	247,292	195,417	248,750
	2	214,792	237,083	195,833	239,375
	3	221,250	237,708	205,000	239,583
	4	220,833	247,500	204,583	249,375
1.4	1	220,625	245,833	204,375	248,125
	2	221,250	236,042	205,417	238,958
	3	227,292	236,458	213,750	238,958
	4	227,292	245,833	212,917	248,542
1.5	1	218,958	246,250	202,917	246,667
	2	219,792	236,875	203,958	237,292
	3	225,833	236,875	212,083	237,708
	4	226,042	246,458	211,458	246,667
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 1	1	216,292	245,667	198,458	247,208
	2	216,792	235,792	199,083	237,833
	3	222,875	236,083	207,667	238,000
	4	222,708	245,750	207,083	247,542

Tabulka P5.2: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 2

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
2.1	1	218,333	247,500	201,250	248,125
	2	218,333	237,917	201,250	238,750
	3	224,167	237,917	207,917	238,542
	4	223,750	247,917	207,708	248,333
2.2	1	219,792	249,167	201,875	249,792
	2	219,583	238,958	201,875	240,000
	3	225,417	238,958	208,542	239,792
	4	225,417	249,167	208,542	249,792
2.3	1	219,375	246,042	201,875	247,708
	2	219,583	236,250	202,292	238,333
	3	225,625	236,458	209,375	238,333
	4	225,208	246,250	208,958	248,125
2.4	1	218,750	247,292	200,000	248,542
	2	218,542	237,708	200,417	238,750
	3	224,792	237,500	206,667	238,958
	4	224,375	247,500	206,875	248,542
2.5	1	218,750	245,625	201,042	247,917
	2	218,958	236,042	201,458	238,542
	3	224,792	236,042	208,125	238,750
	4	224,583	246,042	207,917	248,125
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 2	1	219,000	247,125	201,208	248,417
	2	219,000	237,375	201,458	238,875
	3	224,958	237,375	208,125	238,875
	4	224,667	247,375	208,000	248,583

Tabulka P5.3: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 3

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
3.1	1	219,375	244,375	197,500	243,333
	2	219,375	238,542	197,500	238,958
	3	230,208	238,542	210,625	238,958
	4	230,208	244,375	210,625	243,333
3.2	1	225,833	242,708	206,458	241,458
	2	225,833	236,250	206,458	237,500
	3	236,667	236,042	220,000	237,292
	4	236,667	242,708	220,000	241,458
3.3	1	220,000	245,000	197,708	244,167
	2	220,000	240,000	197,917	240,208
	3	230,208	240,000	210,833	240,208
	4	230,208	245,208	210,833	244,375
3.4	1	218,542	245,208	193,542	244,792
	2	218,542	239,792	193,750	241,042
	3	229,167	240,000	206,458	241,042
	4	229,375	245,417	206,667	245,208
3.5	1	215,833	243,958	190,833	243,958
	2	215,833	238,958	190,833	239,583
	3	226,458	238,958	203,333	239,583
	4	226,667	244,167	203,750	244,167
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 3	1	219,917	244,250	197,208	243,542
	2	219,917	238,708	197,292	239,458
	3	230,542	238,708	210,250	239,417
	4	230,625	244,375	210,375	243,708

Tabulka P5.4: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 4

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
4.1	1	218,958	242,708	197,708	244,167
	2	218,958	236,875	197,917	238,542
	3	229,375	236,667	210,417	238,542
	4	229,167	242,917	210,417	244,375
4.2	1	217,500	242,292	195,625	244,792
	2	217,500	236,458	195,625	239,792
	3	228,125	236,667	208,750	240,000
	4	227,917	242,292	208,542	245,000
4.3	1	216,042	245,208	195,417	245,417
	2	216,042	239,583	195,625	240,625
	3	226,458	239,167	207,917	240,208
	4	226,458	245,208	207,917	245,833
4.4	1	214,167	245,833	191,875	245,208
	2	214,167	240,625	192,083	240,000
	3	225,000	240,417	204,583	240,000
	4	224,792	246,042	204,583	245,417
4.5	1	218,333	243,958	198,333	245,000
	2	217,917	237,500	197,917	238,958
	3	229,167	237,708	210,833	239,167
	4	228,958	243,542	211,042	245,208
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 4	1	217,000	244,000	195,792	244,917
	2	216,917	238,208	195,833	239,583
	3	227,625	238,125	208,500	239,583
	4	227,458	244,000	208,500	245,167

Tabulka P5.5: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 5

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
5.1	1	215,833	247,708	198,542	247,917
	2	216,042	237,292	198,542	238,125
	3	221,875	237,500	205,625	238,125
	4	221,667	247,917	205,417	247,917
5.2	1	217,500	246,875	199,792	246,875
	2	217,500	237,083	200,000	238,125
	3	222,917	237,083	206,667	238,125
	4	222,917	246,875	206,458	247,083
5.3	1	218,958	245,833	201,458	246,042
	2	218,750	235,625	201,250	236,667
	3	224,583	235,833	208,125	236,667
	4	224,792	246,667	208,333	246,458
5.4	1	214,167	249,375	195,833	249,167
	2	214,583	239,375	196,250	239,583
	3	220,417	239,792	202,917	240,000
	4	220,208	249,583	202,917	249,583
5.5	1	210,833	248,333	192,292	247,917
	2	211,250	237,708	192,292	238,333
	3	217,083	237,708	199,375	238,750
	4	217,083	248,125	199,167	247,917
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 5	1	215,458	247,625	197,583	247,583
	2	215,625	237,417	197,667	238,167
	3	221,375	237,583	204,542	238,333
	4	221,333	247,833	204,458	247,792

Tabulka P5.6: Naměřené hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorního vzorku 6

číslo zkušebního vzorku	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
6.1	1	213,125	245,208	176,875	245,208
	2	213,542	238,750	176,875	240,000
	3	223,542	238,542	189,583	240,000
	4	223,750	244,375	190,000	245,417
6.2	1	217,083	243,958	188,333	246,250
	2	217,500	238,333	188,542	240,625
	3	227,500	238,542	201,458	240,625
	4	227,500	244,167	201,667	246,250
6.3	1	215,625	242,292	185,208	242,917
	2	215,833	236,875	185,417	237,500
	3	226,250	237,083	198,958	237,500
	4	226,042	242,708	199,167	243,333
6.4	1	219,792	244,583	193,333	245,625
	2	219,792	239,375	194,167	240,417
	3	230,625	239,167	207,500	240,208
	4	230,833	245,000	207,292	245,417
6.5	1	217,292	242,083	189,583	243,542
	2	217,083	236,875	189,792	238,333
	3	227,083	236,667	202,917	237,917
	4	227,292	242,500	203,333	243,750
průměrné hodnoty pro laboratorní vzorek 6	1	216,583	243,625	186,667	244,708
	2	216,750	238,042	186,958	239,375
	3	227,000	238,000	200,083	239,250
	4	227,083	243,750	200,292	244,833

Tabulka P5.7: Průměrné hodnoty souřadnic bodů vrcholů segmentů laboratorních vzorků

laboratorní vzorek	bod	x_1^o [mm]	x_2^o [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
1	1	216,292	245,667	198,458	247,208
	2	216,792	235,792	199,083	237,833
	3	222,875	236,083	207,667	238,000
	4	222,708	245,750	207,083	247,542
2	1	219,000	247,125	201,208	248,417
	2	219,000	237,375	201,458	238,875
	3	224,958	237,375	208,125	238,875
	4	224,667	247,375	208,000	248,583
3	1	219,917	244,250	197,208	243,542
	2	219,917	238,708	197,292	239,458
	3	230,542	238,708	210,250	239,417
	4	230,625	244,375	210,375	243,708
4	1	217,000	244,000	195,792	244,917
	2	216,917	238,208	195,833	239,583
	3	227,625	238,125	208,500	239,583
	4	227,458	244,000	208,500	245,167
5	1	215,458	247,625	197,583	247,583
	2	215,625	237,417	197,667	238,167
	3	221,375	237,583	204,542	238,333
	4	221,333	247,833	204,458	247,792
6	1	216,583	243,625	186,667	244,708
	2	216,750	238,042	186,958	239,375
	3	227,000	238,000	200,083	239,250
	4	227,083	243,750	200,292	244,833

PŘÍLOHA 6:

LABORATORNÍ PŘÍSTROJ CHK/RMI16000

Technické parametry výkyvného kyvadla:

- hmotnost tělesa kyvadla 21,10 kg
- délka kyvadla 0,8025 m
- maximální úhel výkyvu 135°
- maximální energie 283 J
- maximální rázová rychlost 5,2 m/s
- šířka čelisti (šířka vzorku) 34 mm
- upínací délka vzorku 1000 mm
- přesnost odečítání úhlu 0,5°
- ztráty třením 1,1% E_{\max}

Výpočet parametrů a ověření přístroje:

- hmotnost tělesa kyvadle byla stanovena vážením na kalibrované vážní plošině s digitálním displejem s přesností $\pm 0,01$ kg
- délka kyvadla byla stanovena jako vzdálenost osy otáčení od těžiště kyvadla (střed kruhového průřezu tělesa kyvadla) s přesností $\pm 0,0005$ m – měření bylo prováděno kalibrovaným pásmovým kovovým měřidlem se stupnicí v mm
- maximální úhel výkyvu byl stanoven odečtem z úhlové stupnice s přesností $\pm 0,5^\circ$, současně byl ověřen nastavovaný úhel v každé mezní poloze a ověřeno umístění zarážky v nulové poloze ukazatele

- maximální energie byla stanovena ze vztahu

$$E_{\max} = mgh_{\max} \quad (\text{P6.1})$$

kde maximální výška je

$$h_{\max} = l(1 - \cos \alpha_{\max}) \quad (\text{P6.2})$$

- maximální rychlost stanovena ze vztahu

$$v = \sqrt{2gh_{\max}} \quad (\text{P6.3})$$

- ztráty způsobené třením hlavního ložiska byly stanoveny ze vztahu

$$Z = \frac{E_z}{E_{\max}} \cdot 100[\%] \quad (\text{P6.4})$$

kde E_z je ztráta energie stanovená ze vztahu

$$E_z = E_1 - E_2 = mgl_k(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (\text{P6.5})$$

kde: α_1 je nastavovaný úhel výkyvu

α_2 je konečný úhel překyvu při spuštění přístroje bez zkušební vzorku

PŘÍLOHA 7: **POSTUP MĚŘENÍ NA LABORATORNÍM PŘÍSTROJI CHK/RMI16000**

Nastavení měřicí soustavy:

1. nastavit přepínač režimu na režim měření (nahoru)
(dolů je režim nastavování – využívá se pro servisní zásahy a kalibraci)
2. nastavit rychlost vzorkování (tzn. nastavit dvouciferné číslo vyznačené na štítku, kterému odpovídá vzorkovací frekvence u tohoto čísla uvedená)
 - pomocí páčkového přepínače nastavíme desítky (1 nebo 0) čísla
 - pomocí BCD přepínače nastavíme jednotky čísla**Pozn.: po každé změně vzorkovací frekvence je potřeba resetovat měření, aby změna vešla v platnost!**
3. Spustit aplikační software na PC

Postup při měření:

4. Upnout zkušební vzorek do čelistí.
5. Vychýlit výkyvnou čelist a zajistit aretací, vynulovat úhloměr.
6. Stisknout přepínač start/restart – nové měření
Pozn.: Na restart měření reaguje program smazáním dat z předchozího měření!
7. Odjistit aretaci výkyvné čelisti
8. Vyčkat na konec měření a záznam dat: průběh měření indikují blikající kontrolky (začátek měření indikuje zelená LED, vzorkování červená LED a konec měření žlutá LED, záznam dat indikují kontrolky RX a TX). Program přijímá data a přitom je vykresluje do grafu, dále hledá maximální hodnotu.
Pozn.: S daty můžeme pracovat, až se pohyb grafu ustálí (kontrolky přestanou blikat)!
9. Odečíst úhel výkyvu na stupnici, zapsat maximální sílu (lze uložit do souboru po ukončení více měření).

Práce s daty:

Získaný graf je možno přibližovat a oddalovat kolečkem myši. Levé tlačítko myši posouvá graf a pravé tlačítko ovládá funkci výřezu grafu. Pomocí těchto funkcí je možné zkoumat detaily grafu.

Reset zobrazení

- obnoví výchozí pohled na celý graf

Smazat získaná data

- odstraní načtená data, možno importovat data z předchozích měření

Import hodnot

- umožní import dat z měření
- **pozn.: při výběru vstupních dat je třeba rozlišovat mezi soubory dat z měření a soubory maximálních hodnot z více měření – importovat na místo dat soubor s maximálními hodnotami vede k nedefinovaným výsledkům!**

Uložit BMP

- umožní export aktuálního snímku grafu do souboru BMP
- po stisku tlačítka zvolíme cestu a název souboru pro uložení

Export hodnot

- umožní export dat z daného měření do souboru CSV, který je možno importovat tabulkovými procesory do souboru XLS
- po stisku tlačítka zvolíme cestu a název souboru pro uložení

Export MAX hodnot z více měření

- umožní export maximálních hodnot z měření, která dosud proběhla od spuštění programu
- po stisknutí tlačítka zvolíme cestu a cílový soubor

PŘÍLOHA 8: EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ SOUČiniteLE DYNAMICKÉHO PŮSOBENÍ

Úkol měření

Cílem experimentálního měření bylo stanovit součinitel dynamického působení a dále posoudit vliv vstupních parametrů technologického vypracování spoje na výsledné dynamické charakteristiky.

Prvotním úkolem bylo experimentálním měřením stanovit deformační práci potřebnou k destrukci různě provedených švů a to jak při rázovém, tak při quasistatickém namáhání. Experimentální zjišťování deformační práce v quasistatickém režimu vychází z normované metody pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1 (s upraveným rozměrem vzorku), která je doplněna matematickým zpracováním grafického záznamu. Experimentální zjišťování deformační práce v dynamickém režimu vychází z metody uvedené v kapitole 4.2.2.2.

Měřicí zařízení

Dynamometr PROMI PC 3000

Parametry přístroje:

- rozsah zatížení 0-1000 N
- rozsah pojezdu 0-450 mm
- přesnost $\pm 0,05\%$ z rozsahu

Nastavení přístroje:

- upínací délka 1000 mm
- rychlost posuvu čelistí 100 mm/min

Laboratorní přístroj pro měření rázové pevnosti CHK/RMI16000

Parametry přístroje:

- maximální rázová rychlost 5,2 m/s
- maximální úhel výkyvu 135°
- přesnost odečítání úhlu $0,5^\circ$
- rozsah zatížení tenzometru 0-1000 N
- přesnost tenzometru $\pm 0,02\%$ z rozsahu

Nastavení přístroje:

- počáteční úhel výkyvu 44°
- upínací délka vzorku 1000 mm

Příprava vzorků

Šitý materiál

- druh materiálu	technické plátno
- složení materiálu	100 % bavlna
- dostava (Do/Dú)	26/13
- plošná hmotnost	290 g/m ²
- vazba	plátňová
- šíře	140 cm

Šicí nit

- druh (výrobce)	Epic (Coats)
- složení	100% PES
- jemnost	80
- konstrukce	jádrová

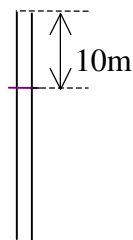
Šicí technika

- šicí stroje	JUKI DDL 5530 (jednoehlový šicí stroj s dvounitným vázaným stehem)
- jemnost šicí jehly	100

Specifikace švů

Hřbetový šev

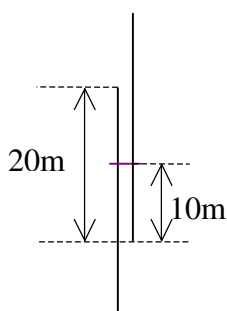
- druh švu	1.01.01
- šířka švové záložky	10 mm
- použitý steh	301
- hustota stehu	4 stehy/cm



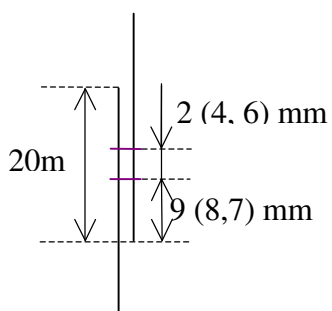
Obrázek P8.1: Schematické znázornění použitého hřbetového švu

Jednoduché přeplátované švy

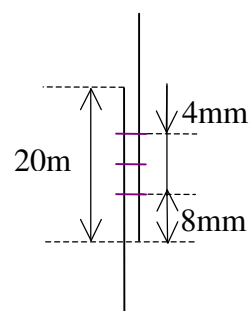
- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| - druh švu | 2.01.01, 2.01.03, 2.01.07 |
| - šířka švové záložky | min 10 mm |
| - použitý steh | 301 |
| - hustota stehu | 4 stehy/cm |
| - vzdálenost stehových řádků | 2, 4, 6 mm |



2.01.01



2.01.03

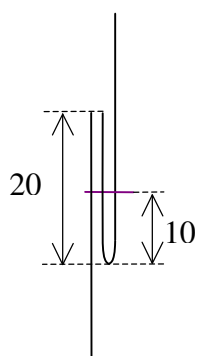


2.01.07

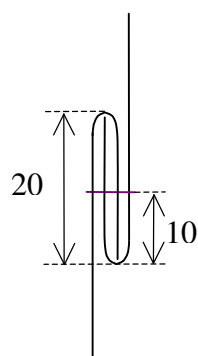
Obrázek P8.2: Schematické znázornění použitých přeplátovaných švů

Zakládané přeplátované švy

- | | |
|-----------------------|------------------|
| - druh švu | 2.02.01, 2.04.01 |
| - šířka švové záložky | 10, 30 mm |
| - použitý steh | 301 |
| - hustota stehu | 4 stehy/cm |



2.02.01



2.04.01

Obrázek P8.3: Schematické znázornění použitých zakládaných švů

Postup zhotovení vzorků

Zhotovení vzorků bylo realizováno v souladu s normou pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 13935-1 dle úprav uvedených v kapitole 4.2.2.2.

Z plošné textilie byl vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech 1400 mm x 1200mm tak, že kratší strana byla položená po útku. Délka zkušebního vzorku byla upravena na hodnotu 1400 mm, šířka na hodnotu 34 mm.

Součinitelé dynamického působení byly určovány pro vybrané zástupce švů (viz specifikace švů).

Postup zkoušky

Quasistatická zkouška

Vzorek se upne do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu. Po spuštění se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí. Zaznamenává se průběh síly v závislosti na deformaci.

Rázová zkouška

Vzorek se upne do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu. Po spuštění působí výkyvná čelist rázově. Zaznamenává se úhel překyvu (při konstantním úhlu výkyvu).

Zpracování naměřených dat

Stanovení deformační práce pro quasistatické namáhání

Deformační práce byla stanovena ze vztahu

$$A_{def}^S = \sum_{i=0}^n \frac{(f(x_i) + f(x_{i+1}))(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (P8.1)$$

kde: $f(x_i)$.. jsou hodnoty působící síly [N]

x_i jsou hodnoty prodloužení vzorku [m]

získané z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech při průběhu statické zkoušky

Vypočtené hodnoty deformační práce viz tab. P8.1 (příklad naměřených hodnot síly a deformace zaznamenaných v krátkých časových intervalech při průběhu statické zkoušky viz tabulka P8.4).

Vypočtené hodnoty byly zpracovány statisticky – byly stanoveny průměrné hodnoty deformační práce.

Stanovení deformační práce pro rázové namáhání

Deformační práce byla stanovena ze vztahu

$$A_{def}^R = 166,11(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (P8.2)$$

kde: α_1 ... nastavovaný úhel výkyvu 44°
 α_2 ... průměrný úhel překyvu

Naměřené hodnoty úhlů překyvu byly zaznamenány do tabulky a statisticky zpracovány – byly stanoveny průměrné hodnoty úhlu překyvu (viz tabulka P8.2).

Vypočtené hodnoty deformační práce viz tab. P8.3.

Stanovení součinitele dynamického působení C_d

Součinitel dynamického působení byl stanoven ze vztahu

$$C_d = \frac{A_{def}^S}{A_{def}^R} \quad (P8.3)$$

kde: A_{def}^S ... je střední hodnota deformační práce při statickém namáhání
 A_{def}^R ... je střední hodnota deformační práce při dynamickém namáhání

Vypočtené hodnoty součinitelů dynamického působení tab. P8.3.

Výsledky měření

Při měření příčné pevnosti švů došlo u všech měřených vzorků k přetrhu nitě ve švu.

Tabulka P8.1: Vypočtené hodnoty deformační práce při quasistatickém namáhání

šev	1.01.01	2.01.01	2.02.01	2.04.01	2.01.03	2.01.07	2.01.03	2.01.03
poč. řádků	1	1	1	1	2	3	2	2
vzdálenost ř.					2mm	2mm	4mm	6mm
č. vz.	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]	A_{def}^S [J]
1	1,320	1,487	1,631	1,747	3,097	4,501	3,438	3,709
2	1,250	1,287	1,527	1,677	3,245	6,023	3,377	3,321
3	1,277	1,159	1,492	1,728	2,685	4,606	3,440	3,447
4	1,198	1,275	1,796	1,733	2,792	4,750	3,035	3,066
5	1,211	1,259	1,807	1,565	3,574	5,375	3,028	2,947
6	1,225	1,222	1,533	1,873	2,950	4,701	2,512	3,496
7	1,364	1,232	1,763	1,623	2,755	6,009	2,642	2,834
8	1,025	1,110	1,448	1,651	2,657	5,456	2,979	3,021
9	1,039	1,351	1,690	1,271	3,375	4,859	3,192	2,745
10	1,084	1,103	1,359	1,616	2,897	5,666	3,311	3,394
průměr	1,199	1,249	1,605	1,648	3,003	5,195	3,095	3,198
s	0,116	0,115	0,156	0,158	0,311	0,582	0,323	0,319
v [%]	9,65	9,20	9,73	9,60	10,37	11,21	10,44	9,97

Tabulka P8.2: Naměřené hodnoty úhlů překyvu

šev	1.01.01	2.01.01	2.02.01	2.04.01	2.01.03	2.01.07	2.01.03	2.01.03
poč. řádků	1	1	1	1	2	3	2	2
vzdálenost ř.					2mm	2mm	4mm	6mm
č. vz.	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]	α_2 [°]
1	42,5	42,5	42,0	43,0	41,5	40,5	41,5	41,5
2	43,0	43,0	42,5	42,0	42,0	41,0	41,5	41,5
3	43,0	43,0	42,5	42,5	42,5	41,5	41,5	41,5
4	43,5	42,5	42,0	42,5	41,5	40,0	41,5	41,0
5	43,0	43,0	42,5	42,0	41,5	41,5	41,5	41,5
6	42,5	42,5	42,5	42,5	41,5	40,5	42,0	41,5
7	42,5	42,5	42,5	42,5	41,5	40,5	41,5	42,0
8	43,0	43,0	43,0	42,5	41,5	41,5	41,5	41,5
9	42,5	43,0	42,5	42,5	41,5	41,5	41,5	41,0
10	43,0	43,0	42,5	42,5	41,5	41,5	41,5	41,5
průměr	42,9	42,8	42,5	42,5	41,7	41,0	41,6	41,5
s	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,2	0,3
v [%]	0,8	0,6	0,7	0,7	0,8	1,4	0,4	0,7

Tabulka P8.3: Výsledky průměrných naměřených hodnot deformační práce a odpovídajících součinitelů dynamického působení

šev/steh	počet/vzdálenost stehových řádků	A_{def}^R [J]	A_{def}^S [J]	C_d
1.01.01/301	1 / 0 mm	2,348	1,199	0,511
2.01.01/301	1 / 0 mm	2,447	1,249	0,510
2.02.01/301	1 / 0 mm	3,134	1,605	0,512
2.04.01/301	1 / 0 mm	3,134	1,648	0,526
2.01.03/301	2 / 2 mm	4,687	3,003	0,641
2.01.07/301	3 / 2 mm	5,932	5,195	0,876
2.01.03/301	2 / 4 mm	4,880	3,095	0,634
2.01.03/301	2 / 6 mm	5,072	3,198	0,631

Tabulka P8.4: Hodnoty z jednoho měření v quasistatickém režimu
(vzorek č. 1 se švem 1.01.01)

$\Delta l[\text{mm}]$	F[N]	$\Delta l[\text{mm}]$	F[N]	$\Delta l[\text{mm}]$	F[N]	$\Delta l[\text{mm}]$	F[N]	$\Delta l[\text{mm}]$	F[N]
0,210	0,695	5,627	6,944	11,647	18,055	18,689	47,222	25,840	144,446
0,271	0,695	5,741	6,250	11,761	18,055	18,802	47,917	25,955	147,919
0,341	0,000	5,855	6,944	11,875	18,750	19,030	50,000	26,067	151,392
0,417	0,695	5,967	7,639	11,988	19,445	19,142	50,695	26,181	154,170
0,501	0,695	6,081	7,639	12,216	20,139	19,256	51,389	26,408	161,114
0,593	0,695	6,196	7,639	12,330	20,139	19,370	52,084	26,522	163,198
0,687	0,695	6,308	8,333	12,442	20,139	19,597	54,862	26,636	166,669
0,784	0,695	6,422	8,333	12,556	20,834	19,711	54,168	26,748	170,142
0,884	1,389	6,536	8,333	12,783	20,834	19,824	54,862	26,975	177,780
0,986	1,389	6,649	8,333	12,897	21,528	19,938	54,862	27,089	181,253
1,092	1,389	6,763	9,028	13,011	22,223	20,164	57,639	27,201	184,726
1,201	1,389	6,877	9,028	13,124	22,223	20,278	58,334	27,316	187,504
1,310	1,389	6,989	9,028	13,352	22,917	20,393	59,723	27,542	194,448
1,424	1,389	7,104	9,028	13,464	23,612	20,505	60,417	27,656	197,921
1,537	2,082	7,218	9,028	13,579	23,612	20,733	63,195	27,770	202,087
1,651	2,082	7,330	9,722	13,693	24,305	20,846	63,890	27,883	205,559
1,765	2,082	7,444	9,028	13,919	25,694	20,960	64,584	28,116	9,028
1,879	2,777	7,558	9,722	14,033	25,694	21,074	65,974	28,230	6,944
1,991	2,777	7,671	9,722	14,146	25,694	21,301	68,750	28,343	4,166
2,106	2,777	7,785	9,722	14,260	26,389	21,415	69,445	28,457	2,777
2,220	2,777	7,899	10,417	14,487	27,083	21,527	70,834	28,684	4,860
2,332	2,777	8,012	10,417	14,601	27,083	21,641	71,529	28,798	5,555
2,446	3,471	8,126	11,111	14,715	27,083	21,868	74,307	28,910	5,555
2,560	3,471	8,240	10,417	14,827	27,778	21,982	75,696	29,024	6,250
2,674	3,471	8,354	11,111	15,056	29,167	22,094	77,085	29,251	6,944
2,787	2,777	8,466	11,111	15,168	29,167	22,209	78,473	29,365	7,639
2,901	3,471	8,581	11,111	15,282	29,861	22,435	81,945	29,479	7,639
3,015	3,471	8,695	11,806	15,396	29,861	22,549	83,334	29,593	8,333
3,128	3,471	8,807	11,806	15,623	31,250	22,663	84,724	29,820	9,028
3,242	3,471	8,921	11,806	15,737	31,250	22,776	85,418	29,934	6,944
3,354	3,471	9,035	12,500	15,849	31,945	23,002	89,584	30,046	6,250
3,468	3,471	9,148	13,194	15,963	32,640	23,116	90,973	30,160	4,860
3,582	4,166	9,262	13,194	16,190	34,029	23,231	92,362	30,387	6,250
3,697	4,166	9,376	13,194	16,304	34,722	23,343	94,446	30,501	7,639
3,809	4,166	9,490	13,194	16,418	34,722	23,571	97,919	30,615	7,639
3,923	4,860	9,603	13,194	16,531	35,416	23,684	100,002	30,728	8,333
4,037	4,860	9,717	13,888	16,759	36,111	23,798	102,084	30,956	5,555
4,150	4,166	9,831	13,888	16,871	36,805	23,912	103,473	31,068	6,944
4,264	4,860	9,943	13,888	16,986	37,500	24,139	108,335	31,183	7,639
4,378	4,860	10,057	14,583	17,100	38,194	24,251	109,030	31,297	8,333
4,492	4,860	10,172	15,277	17,326	39,584	24,365	110,419	31,523	9,028
4,605	5,555	10,286	15,277	17,440	39,584	24,478	113,196	31,637	9,028
4,719	5,555	10,512	15,972	17,553	40,278	24,706	118,058	31,750	9,722
4,833	5,555	10,626	15,972	17,667	40,973	24,818	120,141	31,864	9,028
4,945	6,250	10,739	15,972	17,894	42,362	24,932	122,918	32,092	4,860
5,059	6,250	10,853	15,972	18,008	43,056	25,047	125,696	32,205	0,000
5,174	5,555	11,081	16,666	18,120	43,751	25,273	130,558		
5,286	6,250	11,194	17,361	18,234	44,445	25,387	133,335		
5,400	6,250	11,308	17,361	18,463	45,833	25,500	136,113		
5,514	6,250	11,420	17,361	18,575	46,528	25,614	138,891		

PŘÍLOHA 9:

ANALÝZA RÁZOVÉ PEVNOSTI ŠVU V ZÁVISLOSTI NA JEHO POLOZE

Úkol měření

Cílem experimentálního měření bylo ověření vlivu polohy spoje na rázovou pevnost.

Prvotním úkolem bylo experimentálním měřením stanovit rázovou pevnost různě umístěných švů a úhly překyvu odpovídající ztrátě energie.

Sekundárním úkolem bylo vyhodnocení impulzu rázu a rázové deformační práce.

Experimentální zjišťování rázové pevnosti švů vychází z metody uvedené v kap. 4.2.2.2.

Měřicí zařízení

Laboratorní přístroj pro měření rázové pevnosti CHK/RMI16000

Parametry přístroje:

- maximální rázová rychlost 5,2 m/s
- maximální úhel výkyvu 135°
- přesnost odečítání úhlu 0,5°
- rozsah zatížení tenzometru 0-1000 N
- přesnost tenzometru $\pm 0,02\%$ z rozsahu

Nastavení přístroje:

- počáteční úhel výkyvu 44°
- upínací délka vzorku 1000 mm
- vzorkovací frekvence 10000 Hz

Příprava vzorků

Šitý materiál

- druh materiálu technické plátno
- složení materiálu 100 % bavlna
- dostava (Do/Dú) 22/10
- plošná hmotnost 240 g/m²
- vazba plátňová
- šíře 140 cm

Šicí nit

- druh (výrobce) Saba^c (Amann)
- složení 100% PES
- jemnost 120
- konstrukce jádrová

Šicí technika

- šicí stroje JUKI DDL 5530 (jednoehlový šicí stroj s dvounitým vázaným stehem)
- jemnost šicí jehly 80

Specifikace švů

Hřbetový šev

- druh švu 1.01.01
- šířka švové záložky 20 mm
- použitý steh 301
- hustota stehu 3 stehy/cm

Postup zhotovení vzorků

Zhotovení vzorků bylo realizováno dle metody uvedené v kapitole 4.2.2.2.

Z plošné textilie byl vystřižen laboratorní vzorek o rozměrech 1200 mm x 900mm, který se složil v požadované vzdálenosti od okraje (viz tab. P9.1) do přehybu tak, aby hrana skladu byla rovnoběžná s kratší stranou a současně se směrem útku.

Tabulka P9.1: Specifikace umístění švů na laboratorním a zkušebním vzorku

číslo sady (lab. vzorku)	vzdálenost švu od okraje laboratorního vzorku	vzdálenost švu od čelisti zkušebního přístroje	číslo zk. vzorku
1	200	100	1.1 - 1.7
2	300	200	2.1 - 2.7
3	400	300	3.1 - 3.7
4	600	500	4.1 - 4.7
5	800	700	5.1 - 5.7
6	900	800	6.1 - 6.7
7	1000	900	7.1 - 7.7

Postup zkoušky

Zkouška vychází z namáhání zkušebních vzorků plošné textilie se švem rázovou silou, působící kolmo ke švu. Zaznamenává se úhel překyvu (při konstantním úhlu výkyvu), maximální rázová síla a průběh síly v závislosti na čase.

Zpracování naměřených dat

Stanovení deformační práce pro rázové namáhání

Deformační práce byla stanovena ze vztahu

$$A_{def}^R = 166,11(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (P9.1)$$

kde: α_1 ... nastavovaný úhel výkyvu 44°

α_2 ... průměrný úhel překyvu

Naměřené hodnoty úhlů překyvu byly zaznamenány do tabulky a statisticky zpracovány – byly stanoveny průměrné hodnoty úhlu překyvu (viz tabulka P9.2).

Vypočtené hodnoty deformační práce A_{def}^R pro každou sadu různě umístěných spojů viz tab. P9.5.

Stanovení průměrné rázové síly a impulzu rázové síly

Hodnotu maximální působící síly určíme z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech v průběhu rázového namáhání (příklad hodnot z jednoho měření je v tab. P9.6). Na základě naměřených hodnot maximální rázové síly pro každý zkušební vzorek byla pro každou sadu zkušebních vzorků vypočtena velikost průměrné maximální rázové síly nutné k přetrhu spoje F_{max}^R (výsledky naměřených a průměrných hodnot jsou v tabulce P9.3).

Impuls rázové síly určíme z hodnot zaznamenaných v krátkých časových intervalech v průběhu rázového namáhání vztahem:

$$I^R = \sum_{i=0}^n \frac{(f(t_i) + f(t_{i+1}))(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (P9.2)$$

kde: $f(t_i)$.. hodnoty působící síly [N]

t_i hodnoty času [s]

Dále byl stanoven průměrný impulz rázové síly I^R (výsledky vypočtených a průměrných hodnot jsou v tabulce P9.4).

Výsledky měření

Při měření příčné pevnosti švů došlo u všech měřených vzorků k přetrhu nitě ve švu.

Tabulka P9.2: Naměřené hodnoty úhlů překyvu

č. sady	1	2	3	4	5	6	7
č. zk. vz.	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$	$\alpha_2 [^\circ]$
1	42,6	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5
2	42,3	42,5	42,5	42,3	42,5	42,5	42,6
3	42,5	42,6	42,5	42,5	42,5	43,0	42,5
4	42,6	42,5	42,3	42,5	42,5	42,5	42,6
5	42,8	42,3	42,5	43,0	42,3	42,5	43,0
6	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,7	42,5
7	42,5	42,5	42,5	42,8	42,5	42,5	42,6
průměr	42,5	42,5	42,5	42,6	42,5	42,6	42,6
s	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
v [%]	0,4	0,2	0,2	0,5	0,2	0,4	0,4

Tabulka P9.3: Naměřené hodnoty maximální rázové síly

č. sady	1	2	3	4	5	6	7
č. zk. vz.	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]	F_{\max}^R [N]
1	161,368	154,522	140,178	146,698	156,478	124,530	135,614
2	167,562	164,302	155,500	115,076	159,086	136,592	135,288
3	162,672	168,214	135,288	142,460	151,588	120,944	143,764
4	144,090	145,068	147,024	137,896	136,592	102,037	132,028
5	142,134	147,675	149,958	118,988	159,738	141,156	128,768
6	146,046	141,482	164,628	121,270	136,592	109,860	135,614
7	143,764	147,676	153,218	125,684	156,152	140,504	135,288
průměr	152,519	152,706	149,399	129,725	150,889	125,089	135,195
s	10,841	10,109	9,779	12,481	10,114	15,324	4,567
v [%]	7,11	6,62	6,55	9,62	6,70	12,25	3,38

Tabulka P9.4: Vypočtené hodnoty impulsu rázové síly

č. sady	1	2	3	4	5	6	7
č. zk. vz.	I^R [Ns]	I^R [Ns]	I^R [Ns]	I^R [Ns]	I^R [Ns]	I^R [Ns]	I^R [Ns]
1	0,956	0,877	0,857	0,938	0,841	0,827	0,834
2	0,983	0,921	0,915	0,773	0,939	0,897	0,829
3	0,928	1,055	0,865	0,863	0,912	0,755	0,866
4	0,781	0,849	0,822	0,938	0,838	0,649	0,775
5	0,747	0,916	0,857	0,787	1,031	0,987	0,775
6	0,937	0,826	0,954	0,740	0,877	0,759	0,822
7	0,834	0,847	0,903	0,772	0,904	0,890	0,818
průměr	0,881	0,899	0,882	0,830	0,906	0,823	0,817
s	0,093	0,078	0,044	0,083	0,066	0,112	0,033
v [%]	10,52	8,63	5,04	9,96	7,33	13,66	3,99

Tabulka P9.5: Výsledky průměrných hodnot

číslo sady (lab. vzorku)	vzdálenost švu od čelisti	A_{def}^R [J]	F_{\max}^R [N]	I^R [Ns]
1	100	2,952	152,519	0,881
2	200	3,064	152,706	0,899
3	300	3,092	149,399	0,882
4	500	2,868	129,725	0,830
5	700	3,092	150,889	0,906
6	800	2,840	125,089	0,823
7	900	2,812	135,195	0,817

Tabulka P9.6: Hodnoty z jednoho měření v rázovém režimu (vzorek 1.1)

t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]	t [ms]	F [N]
0,000	9,453	2,506	13,039	5,013	19,559	7,519	32,925	10,026	58,679	12,532	100,081	15,039	146,698
0,083	9,779	2,590	13,365	5,096	20,211	7,603	33,577	10,109	59,331	12,616	101,385	15,122	148,980
0,167	9,453	2,673	13,691	5,180	20,211	7,686	33,577	10,193	60,961	12,699	102,689	15,206	150,284
0,250	10,105	2,757	14,017	5,263	20,537	7,770	34,229	10,276	61,287	12,783	103,340	15,289	151,588
0,334	10,105	2,840	14,017	5,347	20,863	7,853	34,555	10,360	62,917	12,866	104,970	15,373	152,566
0,417	10,431	2,924	14,343	5,430	21,189	7,937	35,207	10,443	63,569	12,950	106,600	15,456	153,870
0,501	10,431	3,007	14,669	5,514	21,515	8,020	35,859	10,527	64,873	13,033	107,578	15,540	155,174
0,584	10,431	3,091	14,343	5,597	21,841	8,104	36,185	10,610	65,525	13,117	109,534	15,623	156,804
0,668	10,757	3,174	14,669	5,681	22,493	8,187	37,489	10,694	66,829	13,200	110,512	15,707	158,108
0,751	10,431	3,258	14,995	5,764	22,819	8,271	38,141	10,777	68,133	13,284	111,164	15,791	159,738
0,835	11,409	3,342	15,647	5,848	23,145	8,355	38,793	10,861	69,111	13,368	112,468	15,874	161,368
0,919	11,409	3,425	15,321	5,932	23,797	8,438	39,445	10,945	69,763	13,451	114,098	15,958	158,760
1,002	11,083	3,509	15,647	6,015	24,123	8,522	40,423	11,028	71,719	13,535	115,076	16,041	153,544
1,086	11,409	3,592	15,647	6,099	25,101	8,605	40,749	11,112	72,371	13,618	115,728	16,125	145,068
1,169	11,409	3,676	15,973	6,182	25,427	8,689	42,379	11,195	74,327	13,702	117,032	16,208	132,028
1,253	11,409	3,759	16,625	6,266	25,101	8,772	42,705	11,279	75,631	13,785	118,988	16,292	115,076
1,336	11,735	3,843	16,299	6,349	25,753	8,856	43,683	11,362	76,609	13,869	120,292	16,375	96,169
1,420	11,735	3,926	16,299	6,433	26,405	8,939	44,987	11,446	78,239	13,952	122,248	16,459	75,957
1,503	11,409	4,010	16,625	6,516	27,057	9,023	45,965	11,529	80,195	14,036	123,552	16,542	53,789
1,587	11,735	4,093	17,277	6,600	27,709	9,106	46,617	11,613	81,499	14,120	125,508	16,626	31,947
1,671	12,061	4,177	16,951	6,684	27,709	9,190	47,595	11,697	83,129	14,203	127,464	16,710	10,757
1,754	12,387	4,261	17,603	6,767	28,361	9,274	48,573	11,780	85,085	14,287	129,094	16,793	0,000
1,838	12,061	4,344	17,603	6,851	28,361	9,357	49,877	11,864	86,389	14,370	131,376		
1,921	12,387	4,428	17,929	6,934	29,339	9,441	50,855	11,947	88,345	14,454	133,332		
2,005	12,713	4,511	18,255	7,018	29,991	9,524	51,507	12,031	89,975	14,537	134,636		
2,088	12,061	4,595	18,255	7,101	30,317	9,608	52,811	12,114	91,605	14,621	136,918		
2,172	12,387	4,678	18,581	7,185	30,317	9,691	54,441	12,198	93,887	14,704	139,200		
2,255	13,039	4,762	18,581	7,268	30,969	9,775	54,767	12,281	95,517	14,788	141,156		
2,339	12,713	4,845	19,233	7,352	31,295	9,858	56,071	12,365	96,821	14,871	142,786		
2,422	12,387	4,929	19,885	7,435	32,273	9,942	57,375	12,449	98,125	14,955	144,416		

PŘÍLOHA 10:

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA DEFORMACE RÁZOVĚ NAMÁHANÉHO VZORKU

Úkol měření

Cílem experimentální analýzy bylo ověřit předpoklad, že se materiál při dynamickém namáhání deformuje méně než při quasistatickém namáhání.

Prvotním úkolem bylo experimentálním měřením stanovit deformaci při rázovém a deformaci při quasistatickém namáhání, a to na vzorcích stejných konfigurací stehu a švu.

Dále byl vyhodnocen průběh deformace vytypovaných vzorků a porovnán s průběhem deformace stejných vzorků při quasistatickém namáhání.

Experimentální zjišťování deformace vychází z normované metody pro tahovou zkoušku EN ISO 13935-1 a z metody uvedené v kap. 4.2.2.2.

Měřicí zařízení

Dynamometr PROMI PC 3000

Parametry přístroje:

- rozsah zatížení 0-1000 N
- rozsah pojezdu 0-450 mm
- přesnost $\pm 0,05\%$ z rozsahu

Nastavení přístroje:

- upínací délka 1000 mm
- rychlost posuvu čelistí 50 mm/min

Laboratorní přístroj pro měření rázové pevnosti CHK/RMI16000

Parametry přístroje:

- maximální rázová rychlost 5,2 m/s
- maximální úhel výkyvu 135°
- přesnost odečítání úhlu $0,5^\circ$
- rozsah zatížení tenzometru 0-1000 N
- přesnost tenzometru $\pm 0,02\%$ z rozsahu

Nastavení přístroje:

- počáteční úhel výkyvu 44°
- upínací délka vzorku 1000 mm
- vzorkovací frekvence 10000 Hz

Vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 3

Parametry kamery:

- maximální rychlost záznamu: 150 000 fps
- maximální paměť: 16 GB

Nastavení přístroje:

- rychlost záznamu: 10 000 fps

Příprava vzorků

Šitý materiál

nízkoroztažná tkanina

- složení materiálu 100 % PES
- dostava (Do/Dú) 22/22
- plošná hmotnost 220 g/m²
- vazba plátňová
- šíře 140 cm

stretchová tkanina

- složení materiálu 98/2 % PES/elastan
- dostava (Do/Dú) 40/30
- plošná hmotnost 210 g/m²
- vazba keprová
- šíře 140 cm

Šicí nit

- druh (výrobce) Saba^c (Amann)
- složení 100% PES
- jemnost 120
- konstrukce jádrová

Šicí technika

- šicí stroje JUKI DDL 5530 (jednožehlový šicí stroj s dvounitným vázaným stehem)
- jemnost šicí jehly 80

Specifikace švů

Hřbetový šev

- druh švu 1.01.01
- šířka švové záložky 20 mm
- použitý steh 301
- hustota stehu 3 stehy/cm

Jednoduchý přeplátovaný šev

- druh švu 2.01.01
- šířka švové záložky 20 mm
- použitý steh 301
- hustota stehu 3 stehy/cm

Postup zhotovení vzorků

Zhotovení vzorků bylo realizováno dle postupu uvedeném v kap. 4.2.2.2.

Z plošné textilie byl vystřížen laboratorní vzorek o rozměrech 1200mm x 1200mm a složen na polovinu tak, aby hrana skladu byla po útku.

Poměrné prodloužení bylo určované pro vybrané zástupce švů a materiálů (viz tabulka P10.1).

Tabulka P10.1: Specifikace vzorků

č. laboratorního vzorku	použitý materiál	použitý šev
1	tkanina (plátno)	1.01.01
2	tkanina (plátno)	2.01.01
3	stretchová tkanina	1.01.01
4	stretchová tkanina	2.01.01

Postup zkoušky

Vzorek se upne do čelistí tak, aby spoj byl uprostřed a síla působila kolmo ke švu.

Při quasistatické zkoušce se horní čelist pohybuje konstantní rychlostí. Zaznamenává se čas, působící síla a změna délky až do přetrhu švu.

Při rázové zkoušce otočná čelist působí rázově. Zaznamenává se čas, působící síla a obrazový záznam průběhu zkoušky (pohybu ukazatele úhlu překyvů) až do přetrhu švu.

Zpracování naměřených dat

Stanovení deformace při quasistatickém namáhání

$$\varepsilon^S = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 \quad (\text{P10.1})$$

Stanovení deformace při rázovém namáhání

$$\varepsilon^R = \left\{ \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{L \cdot \sin \left[\arctg \frac{l_k (1 - \cos \alpha_3)}{L + l_k \sin \alpha_3} \right]} - 1 \right\} \cdot 100 \quad (\text{P10.2})$$

Vypočtené hodnoty byly zpracovány statisticky a znázorněny graficky.

Výsledky měření

Vyhodnocení poměrného prodloužení při rázovém a quasistatickém namáhání

Naměřené hodnoty absolutního prodloužení vzorku při přetrhu při quasistatickém namáhání a naměřené hodnoty úhlu překyvů při přetrhu při rázovém namáhání byly zaznamenány do tabulky (viz tab. P10.2).

Vypočtené hodnoty poměrného prodloužení viz tab. P10.3.

Tabulka P10.2: Naměřené hodnoty absolutního prodloužení vzorku při quasistatickém namáhání a úhlů překyvů při rázovém namáhání

materiál	plátno				stretch			
šev	1.01.01		2.01.01		1.01.01		2.01.01	
č. lab. vz	1		2		3		4	
č. zk. vz.	ΔL [mm]	α_3 [°]	ΔL [mm]	α_3 [°]	ΔL [mm]	α_3 [°]	ΔL [mm]	α_3 [°]
1	155,74	9,5	171,22	10,0	291,75	10,5	348,35	11,5
2	163,75	11,0	168,25	12,0	309,78	9,5	367,50	11,0
3	156,75	10,0	172,25	11,5	286,00	11,5	360,75	13,0
4	157,00	11,0	182,75	11,0	277,75	9,5	340,50	13,5
5	153,25	10,5	163,75	9,5	301,00	12,5	359,50	12,0
6	151,75	11,5	171,75	9,5	274,75	10,5	347,25	12,0
7	147,75	10,0	172,50	9,5	384,00	10,0	336,75	13,5
8	171,65	10,0	171,25	9,5	353,50	13,0	376,75	13,0
9	157,25	9,0	175,00	10,5	290,00	12,5	345,75	12,5
10	171,95	9,0	168,50	9,5	303,25	8,5	351,25	12,0

Tabulka P10.3: Vypočtené hodnoty poměrného prodloužení

materiál	plátno				stretch			
šev	1.01.01		2.01.01		1.01.01		2.01.01	
č. lab. vz	1		2		3		4	
č. zk. vz.	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]	ϵ^S [%]	ϵ^R [%]
1	15,574	13,250	17,122	13,942	29,175	14,632	34,835	16,010
2	16,375	15,322	16,825	16,698	30,978	13,250	36,750	15,322
3	15,675	13,942	17,225	16,010	28,600	16,010	36,075	18,070
4	15,700	15,322	18,275	15,322	27,775	13,250	34,050	18,755
5	15,325	14,632	16,375	13,250	30,100	17,385	35,950	16,698
6	15,175	16,010	17,175	13,250	27,475	14,632	34,725	16,698
7	14,775	13,942	17,250	13,250	38,400	13,942	33,675	18,755
8	17,165	13,942	17,125	13,250	35,350	18,070	37,675	18,070
9	15,725	12,558	17,500	14,632	29,000	17,385	34,575	17,385
10	17,195	12,558	16,850	13,250	30,325	11,865	35,125	16,698
průměr	15,868	14,148	17,172	14,286	30,718	15,042	35,344	17,246
s	0,806	1,176	0,494	1,311	3,497	2,085	1,250	1,158
v [%]	5,08	8,31	2,88	9,18	11,39	13,86	3,54	6,71

Sledování průběhu deformace při rázovém a quasistatickém namáhání

Naměřené hodnoty absolutního prodloužení vzorku v průběhu zkoušky při quasistatickém namáhání a naměřené hodnoty úhlu překyvů v průběhu zkoušky při rázovém namáhání byly zaznamenány do tabulek. Z naměřených hodnot byly vypočítány hodnoty poměrného prodloužení (viz tab. P10.4 – P10.5). Vypočtené hodnoty byly použity pro grafické znázornění závislosti poměrného prodloužení na čase (viz grafy P10.1-P10.2).

Naměřené hodnoty působící síly v průběhu zkoušky při quasistatickém namáhání a při rázovém namáhání byly zaznamenány do tabulek (viz tab. P10.6 – P10.7) a použity pro grafické znázornění závislosti působící síly na čase (viz grafy P10.3-P10.4).

Vyloučením časové osy byly získány podklady pro grafické znázornění závislosti poměrného prodloužení na působící síle (viz tab. P10.8-P10.9 a grafy P10.5-P10.6).

Tabulka P10.4: Naměřené hodnoty úhlu překyvů a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu rázového namáhání

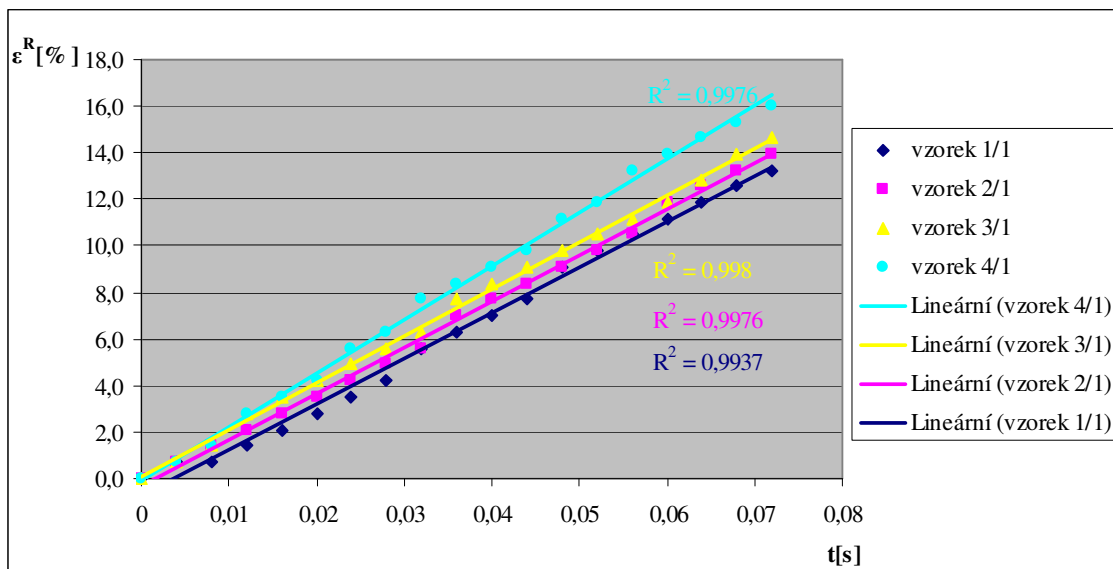
č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	α [°]	ϵ^R [%]	t [s]	α [°]	ϵ^R [%]	t [s]	α [°]	ϵ^R [%]	t [s]	α [°]	ϵ^R [%]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,004	0,500	0,700	0,004	0,500	0,700	0,004	0,500	0,700	0,004	0,500	0,700
0,008	0,500	0,700	0,008	1,000	1,401	0,008	1,000	1,401	0,008	1,000	1,401
0,012	1,000	1,401	0,012	1,500	2,101	0,012	2,000	2,801	0,012	2,000	2,801
0,016	1,500	2,101	0,016	2,000	2,801	0,016	2,500	3,500	0,016	2,500	3,500
0,020	2,000	2,801	0,020	2,500	3,500	0,020	3,000	4,200	0,020	3,000	4,200
0,024	2,500	3,500	0,024	3,000	4,200	0,024	3,500	4,899	0,024	4,000	5,598
0,028	3,000	4,200	0,028	3,500	4,899	0,028	4,000	5,598	0,028	4,500	6,297
0,032	4,000	5,598	0,032	4,000	5,598	0,032	4,500	6,297	0,032	5,500	7,692
0,036	4,500	6,297	0,036	5,000	6,995	0,036	5,500	7,692	0,036	6,000	8,389
0,040	5,000	6,995	0,040	5,500	7,692	0,040	6,500	9,086	0,040	6,500	9,086
0,044	5,500	7,692	0,044	6,000	8,389	0,044	7,000	9,782	0,044	7,000	9,782
0,048	6,500	9,086	0,048	6,500	9,086	0,048	7,500	10,477	0,048	8,000	11,171
0,052	7,000	9,782	0,052	7,000	9,782	0,052	8,000	11,171	0,052	8,500	11,865
0,056	7,500	10,477	0,056	7,500	10,477	0,056	8,500	11,865	0,056	9,000	12,558
0,060	8,000	11,171	0,060	8,500	11,865	0,060	8,500	11,865	0,060	9,500	13,250
0,064	8,500	11,865	0,064	9,000	12,558	0,064	9,500	13,250	0,064	10,500	14,632
0,068	9,000	12,558	0,068	9,500	13,250	0,068	10,000	13,942	0,068	11,000	15,322
0,072	9,500	13,250	0,072	10,000	13,942	0,072	10,500	14,632	0,072	11,500	16,010

Tabulka P10.5: Naměřené hodnoty absolutního prodloužení a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu quasistatického namáhání

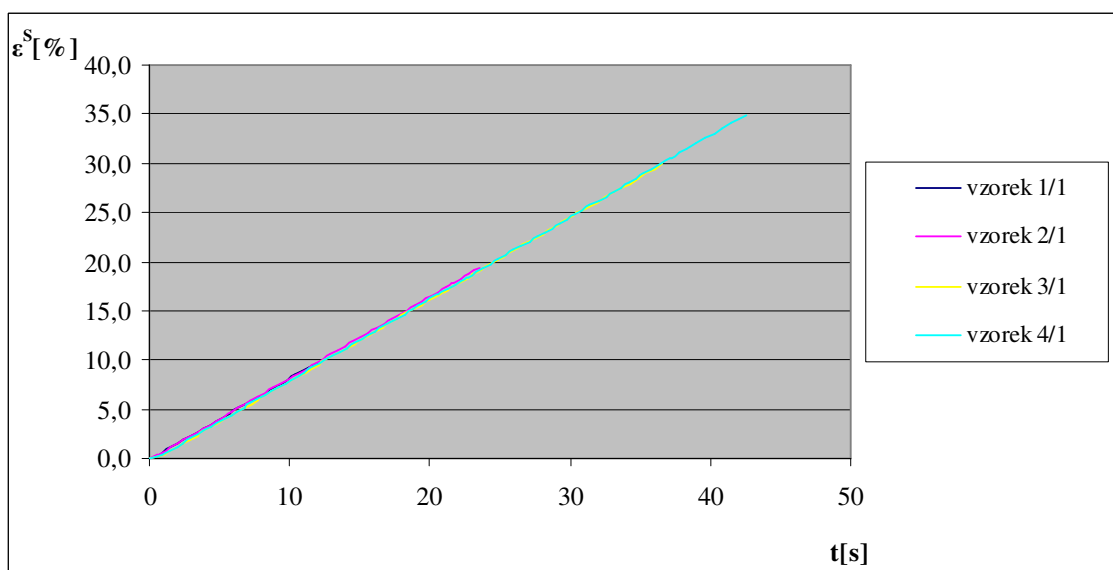
č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	ΔL [mm]	ϵ^S [%]	t [s]	ΔL [mm]	ϵ^S [%]	t [s]	ΔL [mm]	ϵ^S [%]	t [s]	ΔL [mm]	ϵ^S [%]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,407	2,260	0,226	0,422	2,900	0,290	0,391	0,870	0,087	0,406	0,920	0,092
0,891	5,790	0,579	0,906	6,270	0,627	0,891	3,440	0,344	0,906	3,680	0,368
1,375	9,760	0,976	1,391	10,160	1,016	1,359	6,980	0,698	1,375	7,390	0,739
1,860	13,770	1,377	1,875	14,160	1,416	1,844	10,950	1,095	1,875	11,390	1,139
2,360	17,770	1,777	2,359	18,160	1,816	2,344	14,950	1,495	2,328	15,390	1,539
2,828	21,770	2,177	2,844	22,160	2,216	2,813	18,950	1,895	2,828	19,390	1,939
3,313	25,770	2,577	3,313	26,160	2,616	3,297	22,950	2,295	3,313	23,390	2,339
3,782	29,780	2,978	3,797	30,160	3,016	3,766	26,960	2,696	3,781	27,390	2,739
4,266	33,770	3,377	4,281	34,160	3,416	4,266	30,960	3,096	4,266	31,400	3,140
4,766	37,770	3,777	4,766	38,160	3,816	4,766	34,950	3,495	4,750	35,390	3,539
5,313	42,440	4,244	5,313	42,830	4,283	5,328	39,620	3,962	5,313	40,060	4,006
5,782	46,440	4,644	5,797	46,830	4,683	5,797	43,620	4,362	5,797	44,060	4,406
6,282	50,450	5,045	6,266	50,830	5,083	6,281	47,620	4,762	6,281	48,060	4,806
6,813	54,450	5,445	6,766	54,830	5,483	6,766	51,620	5,162	6,750	52,060	5,206
7,313	58,450	5,845	7,250	58,830	5,883	7,250	55,630	5,563	7,234	56,060	5,606
7,828	63,120	6,312	7,750	62,830	6,283	7,719	59,630	5,963	7,734	60,060	6,006
8,344	67,120	6,712	8,266	66,830	6,683	8,188	63,620	6,362	8,203	64,060	6,406
8,844	71,790	7,179	8,766	71,500	7,150	8,672	67,630	6,763	8,688	68,060	6,806
9,375	75,790	7,579	9,281	75,500	7,550	9,172	71,620	7,162	9,156	72,060	7,206
9,891	80,450	8,045	9,797	79,500	7,950	9,656	75,630	7,563	9,641	76,060	7,606
10,407	84,450	8,445	10,297	84,170	8,417	10,125	79,630	7,963	10,125	80,060	8,006
10,922	89,120	8,912	10,813	88,170	8,817	10,594	83,630	8,363	10,609	84,060	8,406
11,422	93,120	9,312	11,313	92,170	9,217	11,078	87,630	8,763	11,078	88,060	8,806
11,953	97,110	9,711	11,828	96,830	9,683	11,578	91,630	9,163	11,563	92,060	9,206
12,500	101,780	10,178	12,359	100,840	10,084	12,063	95,630	9,563	12,047	96,060	9,606
13,047	106,450	10,645	12,891	105,500	10,550	12,531	99,630	9,963	12,531	100,060	10,006
13,594	111,110	11,111	13,438	110,170	11,017	13,031	103,630	10,363	13,063	104,070	10,407
14,141	115,780	11,578	13,969	114,830	11,483	13,547	108,300	10,830	13,563	108,400	10,840
14,703	119,770	11,977	14,531	118,830	11,883	14,078	112,300	11,230	14,063	112,730	11,273
15,328	125,440	12,544	15,156	124,160	12,416	14,672	117,300	11,730	14,672	117,390	11,739
15,969	131,110	13,111	15,797	129,500	12,950	15,266	122,300	12,230	15,266	122,730	12,273
16,532	135,110	13,511	16,344	134,160	13,416	15,797	126,300	12,630	15,766	126,730	12,673
17,078	139,770	13,977	16,891	138,830	13,883	16,313	130,960	13,096	16,281	131,390	13,139
17,641	144,430	14,443	17,422	143,150	14,315	16,813	134,970	13,497	16,813	135,390	13,539
18,313	150,420	15,042	18,063	148,480	14,848	17,406	140,300	14,030	17,422	140,390	14,039
18,907	155,080	15,508	18,609	152,820	15,282	17,969	144,300	14,430	17,922	144,720	14,472
19,000	155,740	15,574	18,703	153,490	15,349	18,063	144,970	14,497	18,000	145,390	14,539
19,453	159,780	15,978	19,172	157,480	15,748	18,516	148,970	14,897	18,438	149,380	14,938
19,922	163,780	16,378	19,641	161,480	16,148	18,969	152,970	15,297	18,859	152,720	15,272

20,453	168,100	16,810	20,219	166,140	16,614	19,516	157,640	15,764	19,391	156,710	15,671
21,000	172,770	17,277	20,797	171,220	17,122	20,063	162,300	16,230	19,906	161,380	16,138
21,469	176,430	17,643	21,250	175,170	17,517	20,516	165,970	16,597	20,328	164,710	16,471
21,907	180,440	18,044	21,672	178,840	17,884	20,969	169,630	16,963	20,750	168,050	16,805
0,000	0,000	0,000	22,188	182,840	18,284	21,516	174,300	17,430	21,250	172,380	17,238
0,000	0,000	0,000	22,703	187,510	18,751	22,078	178,960	17,896	21,766	176,720	17,672
0,000	0,000	0,000	23,219	191,510	19,151	22,625	183,290	18,329	22,281	180,710	18,071
0,000	0,000	0,000	23,641	194,840	19,484	23,078	186,960	18,696	22,703	184,710	18,471
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,703	192,290	19,229	23,328	189,380	18,938
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,359	197,630	19,763	23,938	194,710	19,471
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,906	202,290	20,229	24,484	199,380	19,938
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	25,453	206,960	20,696	25,047	204,050	20,405
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,000	211,630	21,163	25,609	208,710	20,871
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,547	216,300	21,630	26,141	213,040	21,304
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	27,656	225,300	22,530	27,234	222,040	22,204
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,203	229,960	22,996	27,797	226,710	22,671
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,750	234,300	23,430	28,328	231,370	23,137
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,297	238,960	23,896	28,875	235,710	23,571
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,859	243,630	24,363	29,422	240,370	24,037
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,406	248,310	24,831	29,969	244,710	24,471
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	31,500	257,640	25,764	31,078	254,030	25,403
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,063	262,300	26,230	31,625	258,700	25,870
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,656	266,960	26,696	32,156	263,370	26,337
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,234	271,630	27,163	32,703	268,030	26,803
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,813	276,630	27,663	33,266	272,030	27,203
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,406	281,620	28,162	33,813	276,700	27,670
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,984	286,290	28,629	34,359	281,360	28,136
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,578	290,960	29,096	34,906	286,020	28,602
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,672	291,750	29,175	35,000	286,690	28,669
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,766	292,960	29,296	35,094	287,350	28,735
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,859	293,630	29,363	35,188	288,360	28,836
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,734	293,020	29,302
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36,375	298,690	29,869
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,031	303,690	30,369
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,672	309,350	30,935
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,250	314,020	31,402
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,828	318,680	31,868
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,406	323,350	32,335
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,984	328,350	32,835
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	40,563	333,350	33,335
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,141	338,020	33,802
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,734	342,690	34,269
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,313	347,350	34,735
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,406	348,350	34,835
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,500	349,350	34,935
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,578	350,030	35,003

Graf P10.1: Závislost poměrného prodloužení na čase při rázovém namáhání



Graf P10.2: Závislost poměrného prodloužení na čase při quasistatickém namáhání



Tabulka P10.6: Naměřené hodnoty působící síly v průběhu rázového namáhání

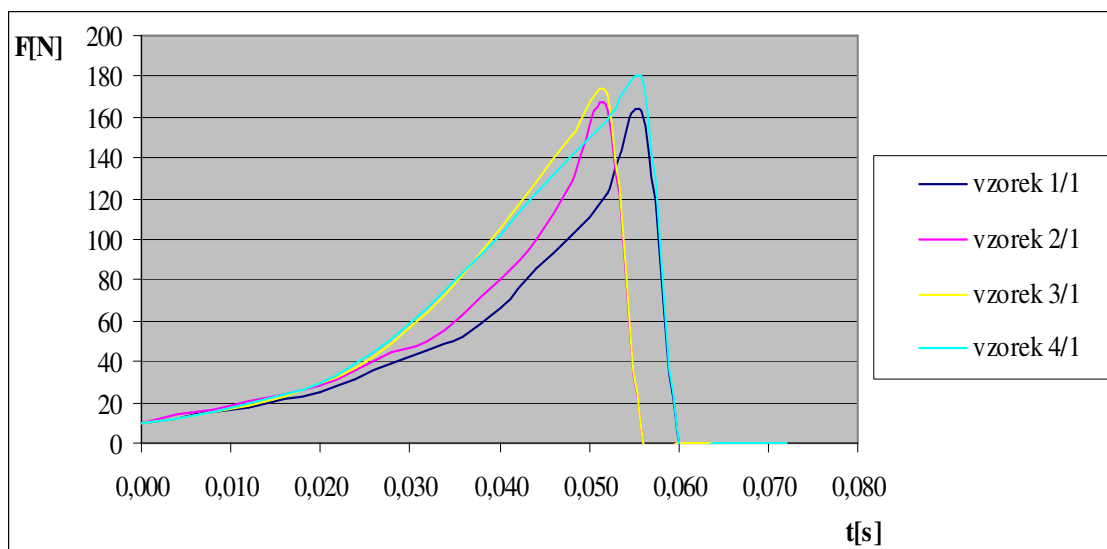
č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	α [°]	F [N]	t [s]	α [°]	F [N]	t [s]	α [°]	F [N]	t [s]	α [°]	F [N]
0,000	0,000	9,779	0,000	0,000	9,779	0,000	0,000	10,105	0,000	0,000	9,779
0,004	0,500	12,387	0,004	0,500	13,691	0,004	0,500	12,061	0,004	0,500	12,387
0,008	0,500	14,995	0,008	1,000	16,625	0,008	1,000	15,321	0,008	1,000	14,995
0,012	1,000	17,929	0,012	1,500	20,211	0,012	2,000	18,581	0,012	2,000	19,233
0,016	1,500	21,515	0,016	2,000	24,449	0,016	2,500	22,819	0,016	2,500	23,797
0,020	2,000	25,427	0,020	2,500	28,361	0,020	3,000	29,013	0,020	3,000	29,665
0,024	2,500	31,621	0,024	3,000	35,533	0,024	3,500	37,163	0,024	4,000	39,119
0,028	3,000	38,793	0,028	3,500	44,335	0,028	4,000	49,225	0,028	4,500	51,181
0,032	4,000	45,313	0,032	4,000	50,529	0,032	4,500	64,221	0,032	5,500	65,851
0,036	4,500	51,833	0,036	5,000	63,243	0,036	5,500	82,477	0,036	6,000	83,455
0,040	5,000	66,177	0,040	5,500	80,521	0,040	6,500	104,970	0,040	6,500	102,363
0,044	5,500	85,411	0,044	6,000	100,407	0,044	7,000	128,442	0,044	7,000	122,574
0,048	6,500	101,711	0,048	6,500	128,116	0,048	7,500	150,936	0,048	8,000	141,482
0,052	7,000	123,226	0,052	7,000	162,672	0,052	8,000	170,496	0,052	8,500	158,434
0,056	7,500	159,738	0,056	7,500	0,000	0,056	8,500	0,000	0,056	9,000	177,342
0,060	8,000	0,000	0,060	8,500	0,000	0,060	8,500	0,000	0,060	9,500	0,000
0,064	8,500	0,000	0,064	9,000	0,000	0,064	9,500	0,000	0,064	10,500	0,000
0,068	9,000	0,000	0,068	9,500	0,000	0,068	10,000	0,000	0,068	11,000	0,000
0,072	9,500	0,000	0,072	10,000	0,000	0,072	10,500	0,000	0,072	11,500	0,000

Tabulka P10.7: Naměřené hodnoty působící síly v průběhu quasistatického namáhání

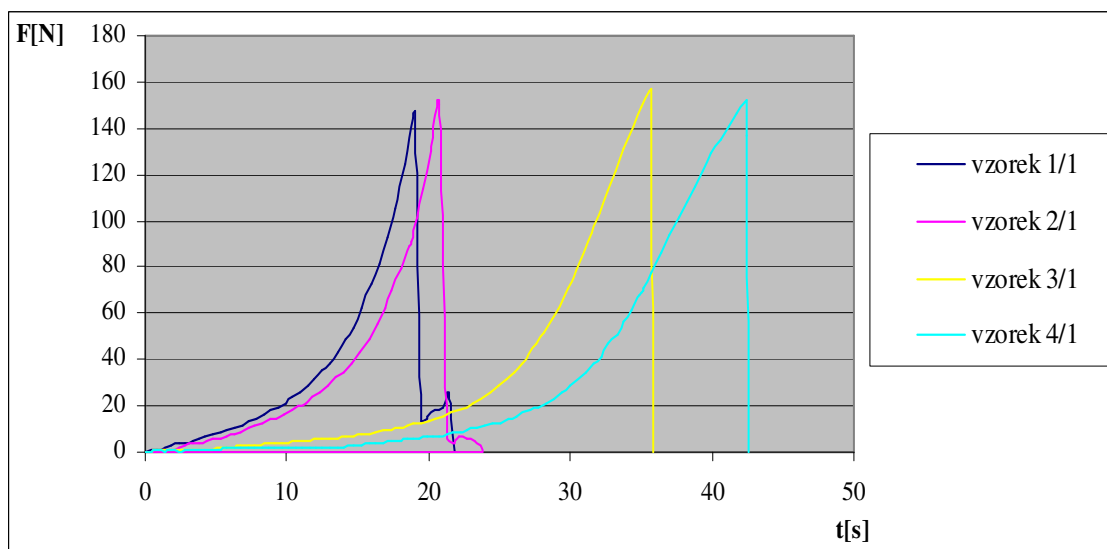
č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	ΔL [mm]	F [N]	t [s]	ΔL [mm]	F [N]	t [s]	ΔL [mm]	F [N]	t [s]	ΔL [mm]	F [N]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,407	2,260	0,479	0,422	2,900	0,478	0,391	0,870	0,000	0,406	0,920	0,000
0,891	5,790	1,436	0,906	6,270	0,478	0,891	3,440	0,479	0,906	3,680	0,479
1,375	9,760	1,915	1,391	10,160	0,957	1,359	6,980	0,479	1,375	7,390	0,000
1,860	13,770	2,394	1,875	14,160	1,436	1,844	10,950	0,479	1,875	11,390	0,479
2,360	17,770	3,352	2,359	18,160	1,915	2,344	14,950	0,958	2,328	15,390	0,000
2,828	21,770	3,831	2,844	22,160	2,394	2,813	18,950	0,958	2,828	19,390	0,479
3,313	25,770	4,789	3,313	26,160	3,352	3,297	22,950	0,958	3,313	23,390	0,479
3,782	29,780	5,268	3,797	30,160	3,831	3,766	26,960	0,958	3,781	27,390	0,479
4,266	33,770	6,226	4,281	34,160	4,310	4,266	30,960	1,436	4,266	31,400	0,479
4,766	37,770	7,184	4,766	38,160	5,268	4,766	34,950	1,436	4,750	35,390	0,958
5,313	42,440	8,142	5,313	42,830	5,747	5,328	39,620	1,915	5,313	40,060	0,958
5,782	46,440	9,578	5,797	46,830	6,705	5,797	43,620	1,915	5,797	44,060	1,437
6,282	50,450	10,057	6,266	50,830	7,663	6,281	47,620	1,915	6,281	48,060	1,437
6,813	54,450	11,494	6,766	54,830	8,620	6,766	51,620	2,394	6,750	52,060	1,437
7,313	58,450	12,931	7,250	58,830	10,057	7,250	55,630	2,394	7,234	56,060	1,437
7,828	63,120	13,889	7,750	62,830	11,015	7,719	59,630	2,873	7,734	60,060	1,437
8,344	67,120	15,805	8,266	66,830	11,973	8,188	63,620	2,873	8,203	64,060	1,437
8,844	71,790	17,720	8,766	71,500	13,889	8,672	67,630	3,352	8,688	68,060	1,915
9,375	75,790	19,157	9,281	75,500	14,368	9,172	71,620	3,352	9,156	72,060	1,915
9,891	80,450	21,073	9,797	79,500	16,283	9,656	75,630	3,831	9,641	76,060	1,437
10,407	84,450	23,468	10,297	84,170	17,720	10,125	79,630	3,831	10,125	80,060	1,915
10,922	89,120	25,862	10,813	88,170	19,636	10,594	83,630	4,310	10,609	84,060	1,915
11,422	93,120	28,736	11,313	92,170	21,073	11,078	87,630	4,789	11,078	88,060	1,437
11,953	97,110	31,131	11,828	96,830	23,467	11,578	91,630	4,789	11,563	92,060	1,915
12,500	101,780	34,962	12,359	100,840	25,862	12,063	95,630	5,268	12,047	96,060	1,437
13,047	106,450	37,836	12,891	105,500	28,736	12,531	99,630	5,268	12,531	100,060	1,915
13,594	111,110	43,104	13,438	110,170	32,567	13,031	103,630	5,747	13,063	104,070	1,915
14,141	115,780	48,372	13,969	114,830	34,483	13,547	108,300	5,747	13,563	108,400	1,437
14,703	119,770	53,641	14,531	118,830	37,836	14,078	112,300	6,226	14,063	112,730	1,915
15,328	125,440	62,261	15,156	124,160	42,625	14,672	117,300	6,226	14,672	117,390	2,394
15,969	131,110	72,319	15,797	129,500	48,851	15,266	122,300	7,184	15,266	122,730	2,873
16,532	135,110	80,940	16,344	134,160	55,077	15,797	126,300	7,663	15,766	126,730	3,352
17,078	139,770	92,434	16,891	138,830	61,782	16,313	130,960	8,621	16,281	131,390	3,352
17,641	144,430	105,366	17,422	143,150	69,924	16,813	134,970	9,099	16,813	135,390	3,831
18,313	150,420	124,523	18,063	148,480	79,503	17,406	140,300	9,578	17,422	140,390	4,310
18,907	155,080	144,160	18,609	152,820	89,082	17,969	144,300	10,057	17,922	144,720	4,310
19,000	155,740	147,033	18,703	153,490	90,997	18,063	144,970	10,536	18,000	145,390	4,789
19,453	159,780	12,931	19,172	157,480	101,534	18,516	148,970	11,015	18,438	149,380	5,268
19,922	163,780	14,847	19,641	161,480	113,507	18,969	152,970	11,973	18,859	152,720	5,268
20,453	168,100	17,720	20,219	166,140	130,270	19,516	157,640	12,452	19,391	156,710	5,747
21,000	172,770	18,678	20,797	171,220	149,907	20,063	162,300	13,410	19,906	161,380	6,226

21,469	176,430	24,425	21,250	175,170	7,663	20,516	165,970	14,368	20,328	164,710	6,705
21,907	180,440	0,000	21,672	178,840	3,831	20,969	169,630	15,326	20,750	168,050	6,705
0,000	0,000	0,000	22,188	182,840	6,705	21,516	174,300	16,762	21,250	172,380	7,184
0,000	0,000	0,000	22,703	187,510	5,747	22,078	178,960	18,199	21,766	176,720	8,142
0,000	0,000	0,000	23,219	191,510	4,310	22,625	183,290	18,678	22,281	180,710	8,621
0,000	0,000	0,000	23,641	194,840	0,000	23,078	186,960	20,594	22,703	184,710	9,100
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,703	192,290	22,989	23,328	189,380	10,057
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,359	197,630	25,383	23,938	194,710	11,015
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,906	202,290	28,257	24,484	199,380	11,973
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	25,453	206,960	31,131	25,047	204,050	12,452
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,000	211,630	34,004	25,609	208,710	13,889
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,547	216,300	37,836	26,141	213,040	14,847
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	27,656	225,300	46,457	27,234	222,040	18,199
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,203	229,960	51,246	27,797	226,710	19,157
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,750	234,300	56,993	28,328	231,370	21,073
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,297	238,960	63,219	28,875	235,710	22,989
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,859	243,630	70,882	29,422	240,370	25,383
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,406	248,310	78,066	29,969	244,710	28,257
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	31,500	257,640	94,350	31,078	254,030	34,483
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,063	262,300	102,971	31,625	258,700	38,315
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,656	266,960	112,550	32,156	263,370	41,188
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,234	271,630	121,171	32,703	268,030	46,457
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,813	276,630	130,749	33,266	272,030	50,288
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,406	281,620	140,328	33,813	276,700	56,035
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,984	286,290	148,949	34,359	281,360	61,304
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,578	290,960	155,654	34,906	286,020	67,530
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,672	291,750	156,991	35,000	286,690	68,488
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,766	292,960	148,217	35,094	287,350	69,924
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,859	293,630	0,000	35,188	288,360	70,882
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,734	293,020	77,587
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36,375	298,690	85,729
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,031	303,690	93,392
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,672	309,350	101,534
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,250	314,020	108,239
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,828	318,680	114,944
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,406	323,350	121,650
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,984	328,350	128,834
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	40,563	333,350	135,060
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,141	338,020	140,807
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,734	342,690	146,554
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,313	347,350	151,344
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,406	348,350	151,823
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,500	349,350	136,976
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,578	350,030	0,000

Graf P10.3: Závislost síly na čase při rázovém namáhání



Graf P10.4: Závislost síly na čase při quasistatickém namáhání



Tabulka P10.8: Naměřené hodnoty působící síly a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu rázového namáhání

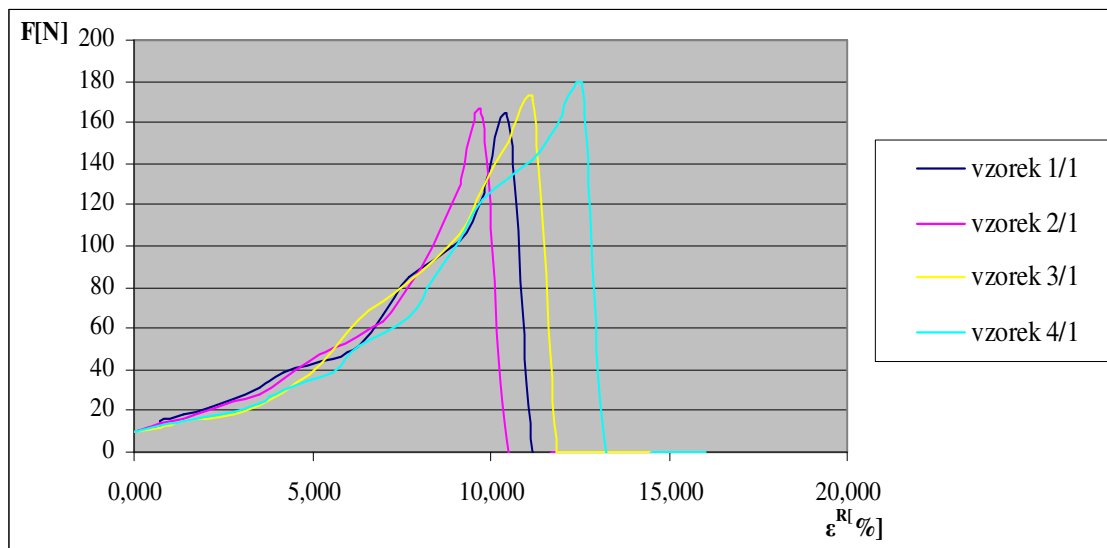
č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	ϵ^R [%]	F [N]	t [s]	ϵ^R [%]	F [N]	t [s]	ϵ^R [%]	F [N]	t [s]	ϵ^R [%]	F [N]
0,000	0,000	9,779	0,000	0,000	9,779	0,000	0,000	10,105	0,000	0,000	9,779
0,004	0,700	12,387	0,004	0,700	13,691	0,004	0,700	12,061	0,004	0,700	12,387
0,008	0,700	14,995	0,008	1,401	16,625	0,008	1,401	15,321	0,008	1,401	14,995
0,012	1,401	17,929	0,012	2,101	20,211	0,012	2,801	18,581	0,012	2,801	19,233
0,016	2,101	21,515	0,016	2,801	24,449	0,016	3,500	22,819	0,016	3,500	23,797
0,020	2,801	25,427	0,020	3,500	28,361	0,020	4,200	29,013	0,020	4,200	29,665
0,024	3,500	31,621	0,024	4,200	35,533	0,024	4,899	37,163	0,024	5,598	39,119
0,028	4,200	38,793	0,028	4,899	44,335	0,028	5,598	49,225	0,028	6,297	51,181
0,032	5,598	45,313	0,032	5,598	50,529	0,032	6,297	64,221	0,032	7,692	65,851
0,036	6,297	51,833	0,036	6,995	63,243	0,036	7,692	82,477	0,036	8,389	83,455
0,040	6,995	66,177	0,040	7,692	80,521	0,040	9,086	104,970	0,040	9,086	102,363
0,044	7,692	85,411	0,044	8,389	100,407	0,044	9,782	128,442	0,044	9,782	122,574
0,048	9,086	101,711	0,048	9,086	128,116	0,048	10,477	150,936	0,048	11,171	141,482
0,052	9,782	123,226	0,052	9,782	162,672	0,052	11,171	170,496	0,052	11,865	158,434
0,056	10,477	159,738	0,056	10,477	0,000	0,056	11,865	0,000	0,056	12,558	177,342
0,060	11,171	0,000	0,060	11,865	0,000	0,060	11,865	0,000	0,060	13,250	0,000
0,064	11,865	0,000	0,064	12,558	0,000	0,064	13,250	0,000	0,064	14,632	0,000
0,068	12,558	0,000	0,068	13,250	0,000	0,068	13,942	0,000	0,068	15,322	0,000
0,072	13,250	0,000	0,072	13,942	0,000	0,072	14,632	0,000	0,072	16,010	0,000

Tabulka P10.9: Naměřené hodnoty působící síly a vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v průběhu quasistatického namáhání

č. lab vz./ č. zk. vz 1/1			č. lab vz./ č. zk. vz 2/1			č. lab vz./ č. zk. vz 3/1			č. lab vz./ č. zk. vz 4/1		
t [s]	ε^S [%]	F [N]	t [s]	ε^S [%]	F [N]	t [s]	ε^S [%]	F [N]	t [s]	ε^S [%]	F [N]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,407	0,226	0,479	0,422	0,290	0,478	0,391	0,087	0,000	0,406	0,092	0,000
0,891	0,579	1,436	0,906	0,627	0,478	0,891	0,344	0,479	0,906	0,368	0,479
1,375	0,976	1,915	1,391	1,016	0,957	1,359	0,698	0,479	1,375	0,739	0,000
1,860	1,377	2,394	1,875	1,416	1,436	1,844	1,095	0,479	1,875	1,139	0,479
2,360	1,777	3,352	2,359	1,816	1,915	2,344	1,495	0,958	2,328	1,539	0,000
2,828	2,177	3,831	2,844	2,216	2,394	2,813	1,895	0,958	2,828	1,939	0,479
3,313	2,577	4,789	3,313	2,616	3,352	3,297	2,295	0,958	3,313	2,339	0,479
3,782	2,978	5,268	3,797	3,016	3,831	3,766	2,696	0,958	3,781	2,739	0,479
4,266	3,377	6,226	4,281	3,416	4,310	4,266	3,096	1,436	4,266	3,140	0,479
4,766	3,777	7,184	4,766	3,816	5,268	4,766	3,495	1,436	4,750	3,539	0,958
5,313	4,244	8,142	5,313	4,283	5,747	5,328	3,962	1,915	5,313	4,006	0,958
5,782	4,644	9,578	5,797	4,683	6,705	5,797	4,362	1,915	5,797	4,406	1,437
6,282	5,045	10,057	6,266	5,083	7,663	6,281	4,762	1,915	6,281	4,806	1,437
6,813	5,445	11,494	6,766	5,483	8,620	6,766	5,162	2,394	6,750	5,206	1,437
7,313	5,845	12,931	7,250	5,883	10,057	7,250	5,563	2,394	7,234	5,606	1,437
7,828	6,312	13,889	7,750	6,283	11,015	7,719	5,963	2,873	7,734	6,006	1,437
8,344	6,712	15,805	8,266	6,683	11,973	8,188	6,362	2,873	8,203	6,406	1,437
8,844	7,179	17,720	8,766	7,150	13,889	8,672	6,763	3,352	8,688	6,806	1,915
9,375	7,579	19,157	9,281	7,550	14,368	9,172	7,162	3,352	9,156	7,206	1,915
9,891	8,045	21,073	9,797	7,950	16,283	9,656	7,563	3,831	9,641	7,606	1,437
10,407	8,445	23,468	10,297	8,417	17,720	10,125	7,963	3,831	10,125	8,006	1,915
10,922	8,912	25,862	10,813	8,817	19,636	10,594	8,363	4,310	10,609	8,406	1,915
11,422	9,312	28,736	11,313	9,217	21,073	11,078	8,763	4,789	11,078	8,806	1,437
11,953	9,711	31,131	11,828	9,683	23,467	11,578	9,163	4,789	11,563	9,206	1,915
12,500	10,178	34,962	12,359	10,084	25,862	12,063	9,563	5,268	12,047	9,606	1,437
13,047	10,645	37,836	12,891	10,550	28,736	12,531	9,963	5,268	12,531	10,006	1,915
13,594	11,111	43,104	13,438	11,017	32,567	13,031	10,363	5,747	13,063	10,407	1,915
14,141	11,578	48,372	13,969	11,483	34,483	13,547	10,830	5,747	13,563	10,840	1,437
14,703	11,977	53,641	14,531	11,883	37,836	14,078	11,230	6,226	14,063	11,273	1,915
15,328	12,544	62,261	15,156	12,416	42,625	14,672	11,730	6,226	14,672	11,739	2,394
15,969	13,111	72,319	15,797	12,950	48,851	15,266	12,230	7,184	15,266	12,273	2,873
16,532	13,511	80,940	16,344	13,416	55,077	15,797	12,630	7,663	15,766	12,673	3,352
17,078	13,977	92,434	16,891	13,883	61,782	16,313	13,096	8,621	16,281	13,139	3,352
17,641	14,443	105,366	17,422	14,315	69,924	16,813	13,497	9,099	16,813	13,539	3,831
18,313	15,042	124,523	18,063	14,848	79,503	17,406	14,030	9,578	17,422	14,039	4,310
18,907	15,508	144,160	18,609	15,282	89,082	17,969	14,430	10,057	17,922	14,472	4,310
19,000	15,574	147,033	18,703	15,349	90,997	18,063	14,497	10,536	18,000	14,539	4,789
19,453	15,978	12,931	19,172	15,748	101,534	18,516	14,897	11,015	18,438	14,938	5,268
19,922	16,378	14,847	19,641	16,148	113,507	18,969	15,297	11,973	18,859	15,272	5,268
20,453	16,810	17,720	20,219	16,614	130,270	19,516	15,764	12,452	19,391	15,671	5,747

21,000	17,277	18,678	20,797	17,122	149,907	20,063	16,230	13,410	19,906	16,138	6,226
21,469	17,643	24,425	21,250	17,517	7,663	20,516	16,597	14,368	20,328	16,471	6,705
21,907	18,044	0,000	21,672	17,884	3,831	20,969	16,963	15,326	20,750	16,805	6,705
0,000	0,000	0,000	22,188	18,284	6,705	21,516	17,430	16,762	21,250	17,238	7,184
0,000	0,000	0,000	22,703	18,751	5,747	22,078	17,896	18,199	21,766	17,672	8,142
0,000	0,000	0,000	23,219	19,151	4,310	22,625	18,329	18,678	22,281	18,071	8,621
0,000	0,000	0,000	23,641	19,484	0,000	23,078	18,696	20,594	22,703	18,471	9,100
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,703	19,229	22,989	23,328	18,938	10,057
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,359	19,763	25,383	23,938	19,471	11,015
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,906	20,229	28,257	24,484	19,938	11,973
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	25,453	20,696	31,131	25,047	20,405	12,452
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,000	21,163	34,004	25,609	20,871	13,889
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,547	21,630	37,836	26,141	21,304	14,847
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	27,656	22,530	46,457	27,234	22,204	18,199
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,203	22,996	51,246	27,797	22,671	19,157
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,750	23,430	56,993	28,328	23,137	21,073
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,297	23,896	63,219	28,875	23,571	22,989
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,859	24,363	70,882	29,422	24,037	25,383
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,406	24,831	78,066	29,969	24,471	28,257
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	31,500	25,764	94,350	31,078	25,403	34,483
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,063	26,230	102,971	31,625	25,870	38,315
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,656	26,696	112,550	32,156	26,337	41,188
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,234	27,163	121,171	32,703	26,803	46,457
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,813	27,663	130,749	33,266	27,203	50,288
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,406	28,162	140,328	33,813	27,670	56,035
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,984	28,629	148,949	34,359	28,136	61,304
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,578	29,096	155,654	34,906	28,602	67,530
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,672	29,175	156,991	35,000	28,669	68,488
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,766	29,296	148,217	35,094	28,735	69,924
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,859	29,363	0,000	35,188	28,836	70,882
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,734	29,302	77,587
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36,375	29,869	85,729
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,031	30,369	93,392
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,672	30,935	101,534
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,250	31,402	108,239
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,828	31,868	114,944
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,406	32,335	121,650
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,984	32,835	128,834
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	40,563	33,335	135,060
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,141	33,802	140,807
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,734	34,269	146,554
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,313	34,735	151,344
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,406	34,835	151,823
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,500	34,935	136,976
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,578	35,003	0,000

Graf P10.5: Závislost poměrného prodloužení na působící síle při rázovém namáhání



Graf P10.6: Závislost poměrného prodloužení na působící síle při quasistatickém namáhání

